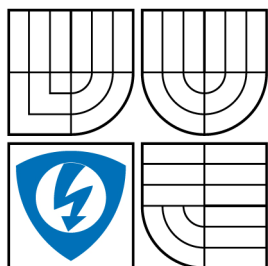


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC
TECHNOLOGY**

METODA NAPĚŤOVÉHO KONTRASTU V EREM

VOLTAGE CONTRAST METHOD IN ESEM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MARTIN KRŇÁVEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

DOC. ING. JOSEF JIRÁK, CSc.



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav elektrotechnologie

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Mikroelektronika a technologie

Student: Martin Krňávek

ID: 111077

Ročník: 3

Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Metoda napětového kontrastu v EREM

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s problematikou environmentální rastrovací elektronové mikroskopie (EREM) a s metodou napětového kontrastu pro sledování rozložení elektrických potenciálů na površích polovodičových součástek. Navrhněte vhodné pracovní podmínky pro pozorování napětového kontrastu v environmentálním mikroskopu pomocí scintilačního detektoru sekundárních elektronů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 8.2.2010

Termín odevzdání: 3.6.2010

Vedoucí práce: doc. Ing. Josef Jiráček, CSc.

prof. Ing. Radimír Vrba, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Licenční smlouva poskytovaná k výkonu práva užít školní dílo

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Martin Krňávek
Bytem: Vikýřovice, Sokolská 390, 788 13
Narozen/a (datum a místo): 27. 4. 1988, Šumperk

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 244/53, 602 00 Brno
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
Prof. Ing. Radomír Vrba, CSc.
(dále jen „nabyvatel“)

Článek 1 Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- ☐ disertační práce
 - ☐ diplomová práce
 - ☒ bakalářská práce
 - ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Metoda napěťového kontrastu v EREM
Vedoucí/ školitel VŠKP: Doc. Ing. Josef Jiráček, CSc.
Ústav: Ústav elektrotechnologie
Datum obhajoby VŠKP:

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v:

- ☒ tištěné formě – počet exemplářů 2
- ☒ elektronické formě – počet exemplářů 1

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ☒ ihned po uzavření této smlouvy
 - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
 - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
 - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
 - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne:

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Abstrakt:

Tato práce obsahuje teoretický popis základních vlastností a principu elektronové mikroskopie, se zaměřením na environmentální rastrovací elektronovou mikroskopii. Popisuje funkci mikroskopu, interakce probíhající po dopadu elektronového svazku na vzorek, především pak vznik zpětně odražených a sekundárních elektronů a metodu napětového kontrastu.

Praktická část se zabývá problematikou napětového kontrastu pro sledování rozložení elektrických potenciálů na površích polovodičových součástek a stanovuje vhodné pracovní podmínky pro pozorování napětového kontrastu pomocí scintilačního detektoru sekundárních elektronů.

Abstract:

This work contains theoretical description of basic features and principles of electron microscopy, with focus on environmental scanning electron microscopy. It describes function of the microscope, interactions that takes place after collision of electron pack with a sample, mainly it describes creation of back reflected electrons and secondary electrons and methods of voltage contrast.

The practical part focus on voltage contrast issue by observing decomposition of electric potentials on surface of semiconductor devices and it establishes ideal working conditions for observing voltage contrast by scintillation detector of secondary electrons.

Klíčová slova:

Environmentální rastrovací elektronový mikroskop (EREM), scintilační detektor (SD), ionizační detektor (ID), sekundární elektrony (SE), zpětně odražené elektrony (BSE).

Keywords:

Environmental scanning electron microscope (ESEM), scintillation detector (SD), ionization detector (ID), secondary electrons (SE), back scattered electrons (BSE).

KRŇÁVEK, M. *Metoda napěťového kontrastu v EREM*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. XY s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Josef Jirák, CSc.

Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

.....

Poděkování:

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Josefu Jirákovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a za další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

Obsah

1. Úvod.....	11
2. Teoretická část.....	12
2.1. Environmentální rastrovací elektronový mikroskop [2]	12
2.2 Vakuová soustava environmentálního mikroskopu [2].....	14
2.3 Detekce signálů v environmentálním mikroskopu [2]	16
2.3.1 Detekce zpětně odražených elektronů	16
2.3.2 Detekce sekundárních elektronů	17
2.4 Rozptyl elektronů [1]	18
2.4.1 Mechanismy rozptylu	18
2.4.2 Zpětně odražené elektrony	19
2.4.3 Sekundární elektrony.....	20
2.5 Princip napěťového kontrastu	23
3. Praktická část.....	25
3.1 Cíl praktické části	25
3.2 Popis měřicího zařízení a jeho nastavení	25
3.3 Vzorek	26
3.4 Popis zpracování naměřených hodnot.....	26
4. Výsledky měření	28
4.1 Měření pomocí ionizačního detektoru.....	28
4.2 Měření pomocí scintilačního detektoru.....	30
4.2.1 Scintilační detektor pro detekci SE v EREM	30
4.2.2 Měření pro nižší tlak	31
4.2.3 Měření pro vyšší tlak	37
5. Závěr.....	43
6. Seznam literatury.....	44
7. Seznam použitých symbolů a zkratek	45
8. Seznam příloh.....	46
8.1 Příloha P1	47
8.2 Příloha P2	53

Seznam obrázků

Obr. 1: Enviromentální rastrovací elektronový mikroskop.....	12
Obr. 2: Zjednodušené vakuové schéma environmentálního rastrovacího elektronového mikroskopu.....	14
Obr. 3: Detektor zpětně odražených elektronů se scintilačním monokrystalem.....	16
Obr. 4: Principiální schéma ionizačního detektoru.....	17
Obr. 5: Zakřivení dráhy elektronu v poli jádra.....	18
Obr. 6: Energetické rozdělení odražených elektronů pro Pt, Cu a Al; $E_0 = 29 \text{ keV}$	19
Obr. 7: Závislost koeficientu emise zpětně odražených elektronů na protonovém čísle Z pro různé úhly dopadu (úhel α je úhel mezi normálou k povrchu a paprskem elektronů) $E_0 = 25,2 \text{ keV}$	20
Obr. 8: Spektrum elektronů po ozáření stříbra elektrony o energii 160 eV	20
Obr. 9: Závislost koeficientu emise SE na úhlu dopadu primárních elektronů.....	21
Obr. 10: Závislost koeficientu emise sekundárních elektronů na energii primárních elektronů při různých úhlech dopadu (měřeno na NiC).....	22
Obr. 11: Princip napěťového kontrastu	23
Obr. 12: Napěťový kontrast na MOS-FET tranzistoru [3] a) napětí na gate je -6V b) napětí na drain je -15V	23
Obr. 13: Zobrazení integrovaného obvodu v napěťovém kontrastu	24
Obr. 14: RP1,RP2 – rotační vývěvy, DP – difuzní vývěva, V1 až V7 – vakuové ventily.....	25
Obr. 15: Vymezení oblasti pro vypočítání střední hodnoty úrovně šedi a) oblast Φ_S pro stanovení střední hodnoty úrovně šedi ve světlé části obrazu a b) oblast Φ_T pro stanovení střední hodnoty úrovně šedi v tmavé části obrazu s kladným potenciálem.	26
Obr. 16: Histogram pro určení střední hodnoty úrovně šedi.....	27
Obr. 17: Napěťový kontrast na výkonovém tranzistoru pozorovaný pomocí ionizačního detektoru.....	29
Obr. 18: Graf závislosti kontrastu na tlaku v komoře vzorku při detekci ionizačním detektorem. Napětí na detektoru 400 V	29
Obr. 19: Principiální schéma scintilačního detektoru pro detekci SE.....	30
Obr. 20: Závislost kontrastu na napětí na elektrodách při konstantním tlaku vodních par 50 Pa . Nastavované hodnoty napětí elektrod $U_{E1} = 100, 200, 300, 400, 450 \text{ V}$, $U_{E2} = 300, 400, 450 \text{ V}$	32
Obr. 21: Závislost kontrastu na napětí na elektrodách při konstantním tlaku vodních par 100 Pa . Nastavované hodnoty napětí elektrod $U_{E1} = 100, 200, 300, 400, 450 \text{ V}$, $U_{E2} = 300, 400, 450 \text{ V}$	32
Obr. 22: Závislost kontrastu na napětí na elektrodách při konstantním tlaku vodních par 150 Pa . Nastavované hodnoty napětí elektrod $U_{E1} = 100, 200, 300, 400, 450 \text{ V}$, $U_{E2} = 300, 400, 450 \text{ V}$	33
Obr. 23: Závislost kontrastu na napětí na elektrodách při konstantním tlaku vodních par 200 Pa . Nastavované hodnoty napětí elektrod $U_{E1} = 100, 200, 300, 400, 450 \text{ V}$, $U_{E2} = 300, 400, 450 \text{ V}$	33
Obr. 24: Závislost kontrastu na napětí na elektrodách při konstantním tlaku vodních par 250 Pa . Nastavované hodnoty napětí elektrod $U_{E1} = 100, 200, 300, 400, 450 \text{ V}$, $U_{E2} = 300, 400, 450 \text{ V}$	34
Obr. 25: Závislost kontrastu na napětí na elektrodách při konstantním tlaku vodních par 300 Pa . Nastavované hodnoty napětí elektrod $U_{E1} = 100, 200, 300, 400, 450 \text{ V}$, $U_{E2} = 300, 400, 450 \text{ V}$	34

Obr. 26: Závislost kontrastu na tlaku vodních par při proměnném napětí na první elektrodě a při konstantním napětí na druhé elektrodě $U_{E2} = 300$ V.	35
Obr. 27: Závislost kontrastu na tlaku vodních par při proměnném napětí na první elektrodě a při konstantním napětí na druhé elektrodě $U_{E2} = 400$ V.	35
Obr. 28: Závislost kontrastu na tlaku vodních par při proměnném napětí na první elektrodě a při konstantním napětí na druhé elektrodě $U_{E2} = 450$ V.	36
Obr. 29: Závislost kontrastu na napětí na elektrodách při konstantním tlaku 300 Pa. Hodnoty napětí na elektrodách $U_{E1} = 240, 260, 280, 300, 320$ V, $U_{E2} = 300, 320, 340$ V.....	37
Obr. 30: Závislost kontrastu na napětí na elektrodách při konstantním tlaku 350 Pa. Hodnoty napětí na elektrodách $U_{E1} = 240, 260, 280, 300, 320$ V, $U_{E2} = 300, 320, 340$ V.....	38
Obr. 31: Závislost kontrastu na napětí na elektrodách při konstantním tlaku 400 Pa. Hodnoty napětí na elektrodách $U_{E1} = 240, 260, 280, 300, 320$ V, $U_{E2} = 300, 320, 340$ V.....	38
Obr. 32: Závislost kontrastu na napětí na elektrodách při konstantním tlaku 450 Pa. Hodnoty napětí na elektrodách $U_{E1} = 240, 260, 280, 300, 320$ V, $U_{E2} = 300, 320, 340$ V.....	39
Obr. 33: Závislost kontrastu na napětí na elektrodách při konstantním tlaku 500 Pa. Hodnoty napětí na elektrodách $U_{E1} = 240, 260, 280, 300, 320$ V, $U_{E2} = 300, 320, 340$ V.....	39
Obr. 34: Závislost kontrastu na napětí na elektrodách při konstantním tlaku 550 Pa. Hodnoty napětí na elektrodách $U_{E1} = 240, 260, 280, 300, 320$ V, $U_{E2} = 300, 320, 340$ V.....	40
Obr. 35: Závislost kontrastu na napětí na elektrodách při konstantním tlaku 600 Pa. Hodnoty napětí na elektrodách $U_{E1} = 240, 260, 280, 300, 320$ V, $U_{E2} = 300, 320, 340$ V.....	40
Obr. 36: Závislost kontrastu na tlaku vodních par při proměnném napětí na první elektrodě a při konstantním napětí na druhé elektrodě $U_{E2} = 300$ V.	41
Obr. 37: Závislost kontrastu na tlaku vodních par při proměnném napětí na první elektrodě a při konstantním napětí na druhé elektrodě $U_{E2} = 320$ V.	41
Obr. 38: Závislost kontrastu na tlaku vodních par při proměnném napětí na první elektrodě a při konstantním napětí na druhé elektrodě $U_{E2} = 340$ V.	42

1. Úvod

Tato bakalářská práce je zaměřena na problematiku environmentální rastrovací elektronové mikroskopie (EREM), detekci signálních elektronů a na metodu napětového kontrastu pro sledování rozložení elektrických polí v polovodičových součástkách. Je také vysvětlen materiálový a topografický kontrast, který je důležitý k pochopení zadané práce.

Environmentální rastrovací elektronový mikroskop představuje moderní výkonný přístroj pro lokální mikroanalýzu, pomocí níž lze charakterizovat heterogenní materiály a jejich povrchové vrstvy tenkým svazkem elektronů. Elektronový svazek je v přístroji základním prostředkem k získání potřebných informací.

Praktická část bakalářské práce je zaměřena na návrh vhodných podmínek pro pozorování napětového kontrastu v environmentálním mikroskopu pomocí scintilačního detektoru sekundárních elektronů. Vhodné podmínky jsou zjišťovány změnou tlaků v komoře vzorku a nastavováním různých napětí na elektrodách scintilačního detektoru.

2. Teoretická část

2.1. Environmentální rastrovací elektronový mikroskop [2]

Environmentální rastrovací elektronová mikroskopie (EREM) je jedním z posledních vývojových stadií rastrovací elektronové mikroskopie. Její počátky se datují od 70. let, kdy předmětem zájmu mnohých badatelů bylo odstranění vlivu elektrického náboje na povrchu nevodivých vzorků napouštěním plynů do komory vzorku. Bylo zjištěno, že v důsledku ionizačních srážek atomů a molekul plynů s elektrony se neprojevuje žádný povrchový negativní náboj na izolačním vzorku, neboť tento náboj je kompenzován srážkovými ionty. Kompenzace elektrického náboje umožňuje přímé pozorování elektricky nevodivých preparátů bez jejich pokrytí elektricky vodivou vrstvou.



Obr. 1: Enviromentální rastrovací elektronový mikroskop

Podstata EREM spočívá v možnosti pozorovat vzorky obsahující určité množství vody nebo pozorovat je při vyšších tlacích ve vzorkové komoře. Skupina vědců zjistila, když přítomný plyn v okolí vzorku obsahuje vodu, je možné vzorek udržet vlhký. V roce 1979 se objevuje práce, v níž jsou popisovány základní principy EREM za podmínek relativně vysokého tlaku plynů ve vzorkové komoře. V 80. letech dochází k revolučnímu zvratu ve vývoji mikroskopů EREM, který byl iniciován Danilátovými pracemi. Základem tohoto zvratu je použití dvou clon oddělujících tlak v komoře vzorku a tlak v elektronově optické části mikroskopu, zavedení tzv. komory diferenciálního čerpání a zejména využití ionizačního detektoru sekundárních elektronů.

Základním rozdílem mezi konvenčním rastrovacím elektronovým mikroskopem (REM) a (EREM), popř. dalšími modifikacemi EREM uváděnými pod názvy variable pressure SEM, natural SEM, low vacuum SEM aj., je tlak v komoře vzorku. Ačkoliv elektronová tryska je obvykle umístěna při tlaku 10^{-3} Pa, v komoře vzorku může být tlak od jednotek Pa do tisíců Pa. Tlak v konvenčním REM je 10^{-3} Pa. Dnešní rastrovací elektronové mikroskopy, které pracují s tlakem ve vzorkové komoře 300 Pa až 2000 Pa, jsou nazývány EREM. Jsou určeny k pozorování vzorků obsahujících větší či menší množství vody. Vzhledem k rozptylu elektronů elektronového svazku při srážkách s plynným prostředím je potřebné omezit jejich dráhu v prostředí s vyššími tlaky. V tubusu mikroskopu s elektronovou optikou je stále

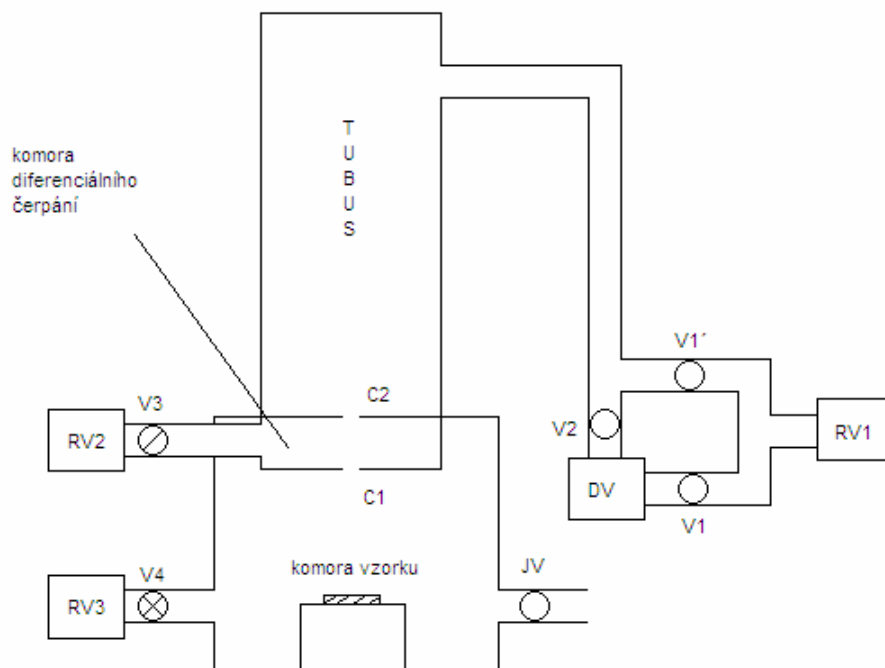
udržován tlak jako v konvenčním REM, vysoký pracovní tlak plynů je pouze v komoře vzorku. Oddělení jednotlivých prostorů s rozdílnými tlaky plynů je uskutečněno pomocí tlak omezujících clon s otvorem velikosti stovek mikrometrů. Tyto clony účinně omezují proudění plynů mezi jednotlivými oblastmi mikroskopu, umožňují jejich separátní čerpání a otvorem clony je zajištěn průchod primárních elektronů elektronového svazku směrem ke vzorku.

Mikroskopy, ve kterých tlak ve vzorkové komoře nepřevyší 300 Pa, se většinou nazývají variable pressure (VP) nebo low vacuum (LV) a slouží především k pozorování izolačních vzorků nebo vzorků odolnějších tkání. K oddělení tubusu mikroskopu od vzorkové komory v tomto případě vystačíme s jednou tlak omezující clonou, která je současně i aperturní clonou projekční čočky mikroskopu. K hlavním uváděným přednostem této skupiny mikroskopů patří omezení nabíjecích jevů a odstranění nutnosti pokovení nevodivých vzorků, snížené vysoušení vlhkých vzorků a jednoduchý přechod od funkce konvenčního REM k mikroskopu s vyšším tlakem v komoře vzorku. Důvod tohoto do jisté míry omezeného použití je ten, že mikroskopy typu VP nebo LV používají k detekci až na jednu výjimku pouze zpětně odražené elektrony (BSE), nesoucí informaci o materiálovém složení vzorku. Pokud se materiálové složení vzorku dané změnou jeho atomového čísla nemění (jak je tomu u některých živočišných biologických vzorků), je velmi obtížné demonstrovat povrchovou strukturu takových vzorků bez kovového vodivého pokrytí. Je to proto, že hustoty povrchu měkkých tkání živočišných vzorků jsou nižší než vzorků rostlinných. Při standardních urychlovacích napětích primárního elektronového svazku 10-20 kV pronikají elektrony svazku do velké hloubky vzorku (nad 10 nm) a zobrazení pomocí zpětně odražených elektronů, jejichž energie je jen o něco málo nižší než energie primárních elektronů svazku, je nekонтрастní, spíše transparentní. Řešením je buď použití nízkého napětí elektronového svazku 3 až 5 kV nebo detekce zpětně odražených elektronů v nízkém úhlu snímání nebo použití detektoru sekundárních elektronů (SE).

Mikroskopy pracující s tlakem v komoře vzorku nad 300 Pa vyžadují užití minimálně dvou tlak omezujících clon. Prostor mezi nimi, nazývaný komora diferenciálního čerpání, je vakuově čerpán obvykle rotační vývěvou. Komora může být integrována do objektivu mikroskopu a zajišťuje postupný přechod od tlaků kolem 1000 Pa v okolí vzorku k tlakům menším než 10^{-3} Pa v tubusu mikroskopu. Protože sekundární elektrony nelze v podmínkách ESEM detekovat pomocí komerčního Everhartova-Thornleyho detektoru z důvodu nutnosti přiložit vysoké napětí (+10 kV) ke scintilátoru, používá se detektor, který pracuje na principu zesílení signálu elektronů nárazovou ionizací v elektrostatickém poli vytvořeném v plynném prostředí v okolí vzorku. Je zřejmé, že detektorový systém sehrává mimořádně důležitou roli v možnostech zobrazení vzorků při různých hodnotách tlaku v komoře vzorku (upraveno podle [2]).

2.2 Vakuová soustava environmentálního mikroskopu [2]

Vakuová soustava environmentálního mikroskopu musí umožnit dosažení rozdílných tlaků plynu v jeho jednotlivých částech. Tlak požadovaný pro činnost přímo žhavené wolframové katody 10^{-3} Pa lze v tubusu zajistit užitím clon omezujících tlak a samostatným čerpáním jednotlivých oblastí, oddělených těmito clonami. Zjednodušené schéma vakuového systému environmentálního mikroskopu, pracujícího s přímo žhavenou wolframovou katodou a komorou vzorku s tlaky řádově tisíců Pa, je znázorněno na obr. 2.



Obr. 2: Zjednodušené vakuové schéma environmentálního rastrovacího elektronového mikroskopu.

RV1, RV2, RV3 – rotační vývěvy, DV – difuzní vývěva, V1, V1', V2, V3, V4 – vakuové ventily, JV – jehlový ventil, C1, C2 – tlak omezující clony.

Jednoduchý systém vakuového čerpání environmentálního mikroskopu využívá dvou tlak omezujících clon. Tyto clony s malými otvory umožňují potlačit proudění plynů mezi jednotlivými prostory s rozdílnými tlaky a společně s účinným čerpáním jednotlivých oblastí umožňují dosáhnout požadovaný spád tlaků. Otvory v clonách současně dovolují projít elektronům primárního svazku z tubusu do komory vzorku.

Vakuová clona C2 plní současně funkci aperturní clony objektivu mikroskopu, prostor mezi ní a clonou C1 bývá nazýván komorou diferenciálního čerpání. Vzhledem k požadavku na omezení proudění plynů mezi oblastmi s různými tlaky je potřebné zajistit, aby otvory ve clonách C1 a C2 byly co nejmenší. Zmenšování je však omezeno požadavky elektronové optiky v případě clony C2, zmenšování otvoru clony C1 snižuje velikost zorného pole mikroskopu.

Připouštění požadovaných plynů do komory vzorku zajišťuje jehlový ventil. Pracovního tlaku plynu v tomto prostoru se dosáhne ustavením rovnováhy mezi připouštěním plynu a čerpáním komory rotační vývěvou RV3. V mnoha případech stačí čerpat komoru vzorku přes tlak omezující clonu z prostoru komory diferenciálního čerpání.

Prostor mezi oběma tlak omezujícími clonami je obvykle čerpán rotační vývěvou, je však uváděna možnost využít soustavy rotační a turbomolekulární vývěvy. Tento prostor je obvykle integrován do objektivu mikroskopu. Vzhledem k omezeným rozměrům prostoru mezi clonami C1 a C2 je požadavek na účinné čerpání spojen nejen s užitím vývěv s dostatečnou čerpací rychlostí, ale zejména s konstrukčním řešením, které zajišťuje dosažení potřebné vodivosti vakuového rozvodu v této oblasti. Prostor tubusu nad clonou C2 je čerpán obvyklými vakuovými systémy.

Environmentální mikroskopy, u kterých je zdrojem elektronů katoda autoemisní, vyžadují vícestupňovou redukci tlaků zavedením dalších tlak omezujících clon a odděleného čerpání prostorů mezi nimi. Naopak mikroskopy pracující s tlaky v komoře vzorku do přibližně 400 Pa vystačí s jednou tlak omezující clonou, která současně vykonává funkci aperturní clony objektivu.

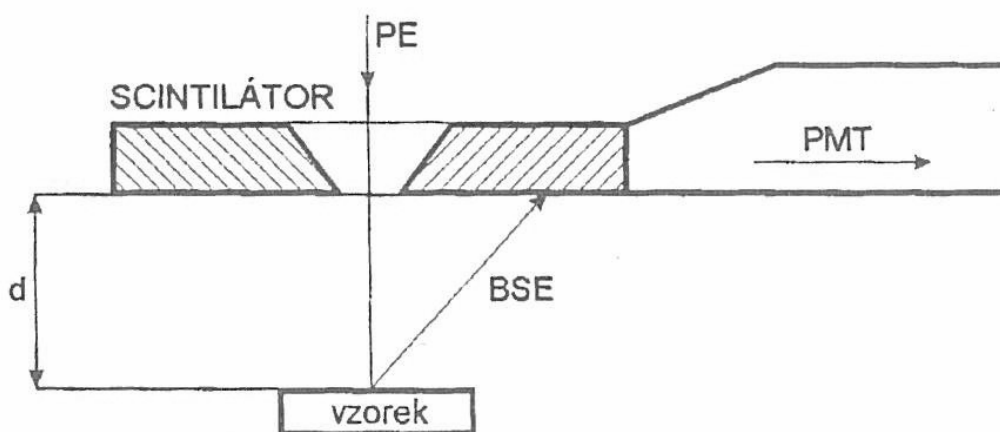
2.3 Detekce signálů v environmentálním mikroskopu [2]

V environmentálním mikroskopu lze detekovat stejné signály jako v klasickém rastrovacím elektronovém mikroskopu. Vzhledem k používaným tlakům v komoře vzorku nemá smysl uvažovat o detekci Augerových elektronů.

2.3.1 Detekce zpětně odražených elektronů

Zpětně odražené elektrony se vzhledem ke své energii pohybují plynným prostředím komory vzorku na kratší vzdálenosti bez velké ztráty energie. Pokud není vzdálenost mezi vzorkem a detektorem příliš velká, je část elektronů vychýlená do větší vzdálenosti od původního směru emise rovněž zanedbatelná. Detektory zpětně odražených elektronů proto musí být konstrukčně navrženy tak, aby jejich geometrické uspořádání vyhovovalo požadavku na omezení délky dráhy elektronů v plynném prostředí. Pro detekci se užívají scintilační nebo polovodičové detektory. Plyn v komoře vzorku zajišťuje omezení nabíjecích jevů, proto scintilátor detektoru nemusí být pokoven, pokud kovová vrstva slouží pouze k odvedení elektrického náboje z jeho povrchu.

Konstrukční uspořádání scintilačního detektoru s velkým sběrovým úhlem, zajišťujícím účinnou detekci i při vyšších tlacích, je patrné z obr. 3. Detektor je v konstrukčním uspořádání znázorněném na obr. 3 současně použit i ve funkci tlak omezující clony C1 vakuového systému environmentálního mikroskopu. Scintilační monokrystal s kruhovým otvorem o průměru stovek mikrometrů ve svém středu umožňuje průchod primárního svazku elektronů do komory vzorku a současně omezuje proudění plynů mezi prostory s různými tlaky.

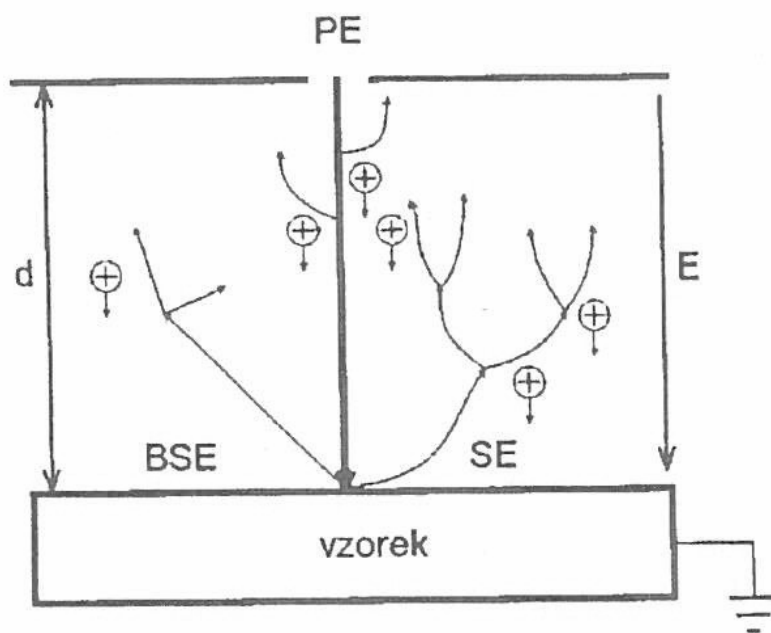


Obr. 3: Detektor zpětně odražených elektronů se scintilačním monokrystalem

Pro zajištění co nejmenších ztrát elektronů primárního svazku jejich srážkami s plyny, a to zejména při použití vysokých hodnot tlaků v komoře vzorku, je nutné použít co nejmenší pracovní vzdálenost vzorku od clony C1.

2.3.2 Detekce sekundárních elektronů

Scintilační detektory, používané pro detekci sekundárních elektronů, vyžadují užití urychlovacího pole s potenciálem několika kilovoltů. Elektrické pole o požadované intenzitě, které dodává sekundárním elektronům potřebnou energii pro vybuzení scintilací, popř. pro generaci dostatečného počtu párů elektron-díra, však není možné realizovat v případě, kdy se pracuje s tlaky v komoře vzorku řádově stovek až tisíců Pa. V tomto případě se pro detekci sekundárních elektronů nabízí použít ionizační detektor, který k zesílení signálu využívá nárazovou ionizaci v plynech. Při popisu činnosti detektoru lze vyjít z funkce deskového kondenzátoru s plynným dielektrikem, jehož uspořádání jako ionizačního detektoru vidíme na obr. 4.



Obr. 4: Principiální schéma ionizačního detektoru.

Vzorek je uzemněn a působí jako spodní elektroda deskového kondenzátoru. Primární svazek elektronů vstupuje otvorem v horní elektrodě kondenzátoru, která je oproti vzorku na kladném potenciálu řádově stovek voltů. Intenzita elektrického pole mezi deskami kondenzátoru je dostatečná k vyvolání podmínek nárazové ionizace v plynném prostředí komory vzorku. Při dopadu primárních elektronů na vzorek dochází k emisi sekundárních a zpětně odražených elektronů. Jako původní generační zdroje pro nárazovou ionizaci působí elektrony primárního svazku, sekundární elektrony a zpětně odražené elektrony. V procesu nárazové ionizace, charakterizované prvním Townsendovým ionizačním součinitelem, dochází k lavinovitému zesílení signálů z jednotlivých generačních zdrojů.

Vznikající kladné ionty se pohybují směrem ke vzorku. Z jeho povrchu uvolňují nové elektrony s pravděpodobností danou druhým Townsendovým ionizačním součinitelem. Tyto nově generované elektrony se opět účastní procesu nárazové ionizace a přispívají k celkovému proudu elektronů a iontů. Kladné ionty na povrchu elektricky nevodivých vzorků kompenzují záporný elektrický náboj, vznikající dopadem primárního svazku elektronů. Elektrony generované v plynném prostředí nárazovou ionizací jsou zachyceny horní elektrodou. Signál je dále elektronicky zesílen a přináší informaci o vzorku.

2.4 Rozptyl elektronů [1]

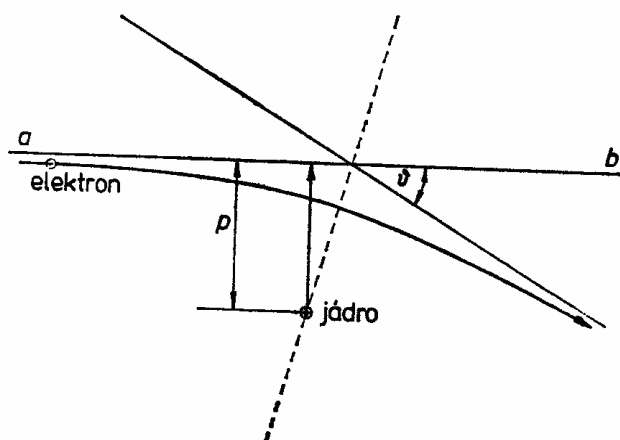
Rozptyl je fyzikální jev, který způsobuje, že pohybující se částice (rychlé elektrony) při průchodu hmotou se začnou rozptylovat, tj. odchylovat od původního směru svého pohybu. Tento jev si můžeme představit tak, že letící elektron naráží na náhodně rozložené koule (atomy), od kterých se odráží do různých směrů.

2.4.1 Mechanismy rozptylu

Rozptyl elektronů způsobují různé mechanismy. Při průchodu hmotou se elektrony nejen rozptylují, ale také ztrácejí při srážkách s atomy část své energie. V zásadě mohou při nárazu elektronu na atom nastat dva případy: elektron se buď odrazí (odchýlí) do jiného směru bez ztráty své původní rychlosti (energie), nebo část energie předá atomu a dále se pohybuje se zmenšenou kinetickou energií. První případ připomíná ráz pružných koulí, známý z klasické mechaniky, a proto se mluví o pružném rozptylu. Druhý případ lze přirovnat k rázu nepružných (plastických) těles, a proto se tento druh rozptylu nazývá nepružným.

2.4.1.1 Pružný rozptyl

Při pružném rozptylu dochází k odchylení elektronu vlivem elektrického pole atomu. Nejprve se budeme zabývat jednoduchým případem odchylení letícího elektronu jedním atomovým jádrem. Předpokládejme, že ve velké vzdálenosti od jádra se elektron pohybuje rychlostí v podél přímky ab (obr. 5).



Obr. 5: Zakřivení dráhy elektronu v poli jádra

Písmenem p označme vzdálenost přímky ab od středu jádra. Mezi oběma částicemi působí Coulombova síla. Z výpočtu podle zákonů klasické mechaniky vyplývá, že výsledná dráha bude hyperbola, přičemž atomové jádro bude ležet v ohnisku této hyperboly a přímka ab je jednou z asymptot. Výpočtem lze také určit rozptylový úhel ϑ .

$$\cot g \frac{\vartheta}{2} = \frac{m_e}{2e^2} \cdot \frac{v^2}{Z} \cdot p \quad (1)$$

Kde m_e je hmotnost elektronu, v – rychlost elektronu, p – náměrná vzdálenost, e – náboj elektronu, Z – atomové číslo jádra.

2.4.1.2 Nepružný rozptyl

Při nepružném rozptylu jsou vybuzeny elektrony v atomech na vyšší energetické hladiny nebo nastává ionizace atomu. Celkový účinný průřez bude pak součtem účinných průřezů pro rozptyl na jednotlivých hladinách. Označíme-li pravděpodobnost pružného rozptylu elektronu $p_0(v)$ a pravděpodobnost nepružného rozptylu vybuzením n -té hladiny atomu $p_n(v)$, bude celkový účinný průřez dán vztahem, kde σ_0 a σ_n značí účinné průřezy pro jednotlivé procesy.

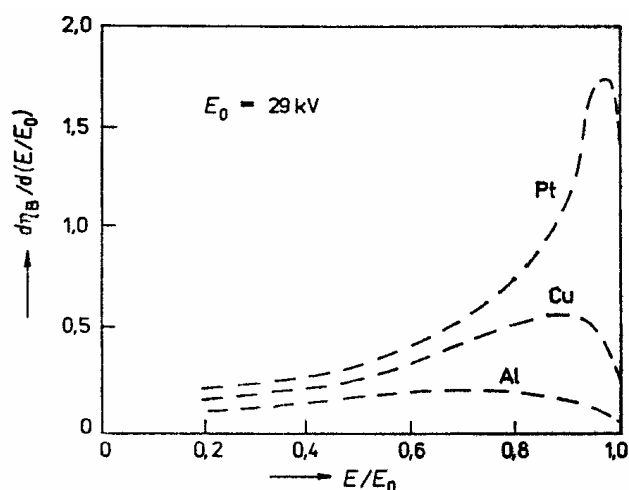
$$\sigma = p_0(v) \cdot \sigma_0 + \sum p_n(v) \cdot \sigma_n = \sigma_0 + \sum \sigma_n \quad (2)$$

2.4.2 Zpětně odražené elektrony

V pružném rozptylu jsme zjistili, že úhel rozptylu může být tak velký, že urychlený primární elektron může být vržen zpět. Obrácení směru pohybu elektronu může také nastat mnohonásobnými srážkami s malým úhlem rozptylu. Jestliže primární elektron neztratí energii nepružnou srážkou, může vzorek opustit. Ve skutečnosti však elektron vždy část své energie ve vzorku ztratí. Elektrony, které vzorek skutečně opustí, se nazývají zpětně odražené. Spektrum energie odražených elektronů má maximum většinou při $E/E_0 = 0,8$ až $0,9$ (E_0 je energie primárního elektronu, E je skutečná energie elektronů). Příklad spektra elektronů odražených z Pt, Cu, Al je uveden na obr. 6.

$$\eta = \frac{I_{BSE}}{I_{PE}} < 1 \quad (3)$$

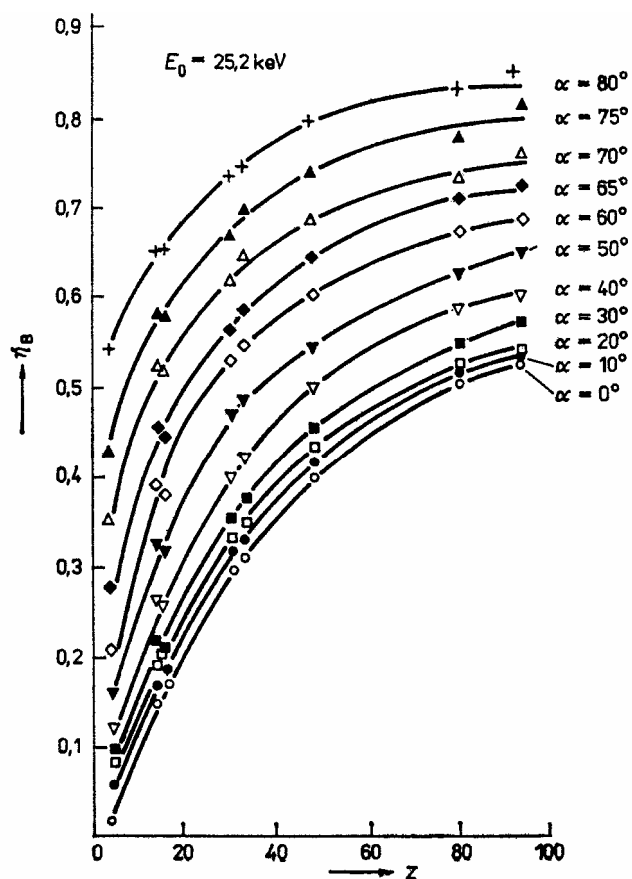
- η je koeficient emise zpětně odražených elektronů, I_{BSE} je počet zpětně odražených elektronů, I_{PE} je počet primárních dopadajících elektronů



Na obr. 6 je počáteční energie elektronů E_0 je 29 keV. Množství odražených elektronů je charakterizována diferenciálním koeficientem odrazivosti $d\eta_B/dE$.

Množství zpětně odražených elektronů vzrůstá s atomovým číslem vzorku a s energií primárních elektronů.

Obr. 6: Energetické rozdělení odražených elektronů pro Pt, Cu a Al; $E_0 = 29 \text{ keV}$

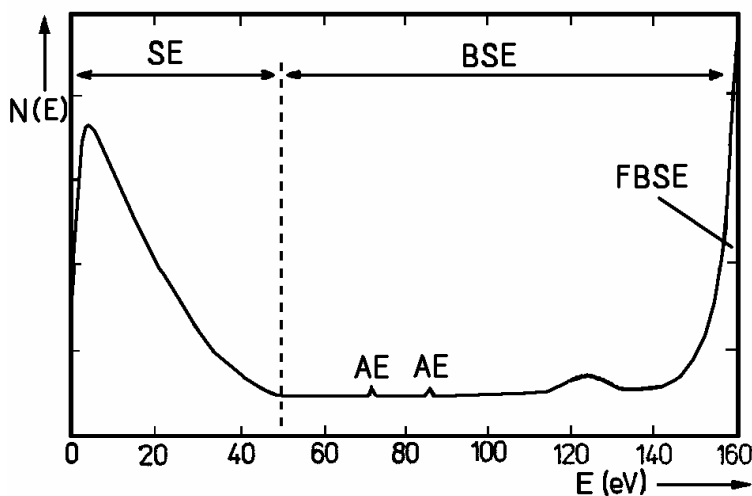


Koeficient emise zpětně odražených elektronů tlustého vzorku silně závisí na úhlu dopadu primárních elektronů. Závislost η_B na protonovém čísle Z a na úhlu dopadu α (úhel mezi normálou povrchu vzorku a paprskem dopadajících elektronů) je znázorněna na obr. 7. Počáteční energie $E_0 = 25,2$ keV.

Obr. 7: Závislost koeficientu emise zpětně odražených elektronů na protonovém čísle Z pro různé úhly dopadu (úhel α je úhel mezi normálou k povrchu a paprskem elektronů) $E_0 = 25,2$ keV.

2.4.3 Sekundární elektrony

Při dopadu svazku rychlých elektronů na povrch vzorku se v blízkosti povrchu objeví kromě zpětně odražených elektronů ještě další skupina elektronů. Tyto elektrony mají energii jednotek až desítek eV a nazývají se sekundární.



Obr. 8: Spektrum elektronů po ozáření stříbra elektrony o energii 160 eV

Na obr. 8 je zachyceno typické spektrum získané při ozáření stříbra elektrony o energii 160 eV. Oblast FBSE reprezentuje pružně rozptýlené zpětně odražené elektrony, oblast BSE jsou zpětně odražené elektrony, které prodělaly nepružnou srážku, oblasti AE jsou Augerovy elektrony a oblast SE představuje sekundární elektrony. Protože emise sekundárních elektronů je nejvyšší při nízkých energiích primárních elektronů, prováděla se většina experimentů s elektrony o energii do 1000 eV.

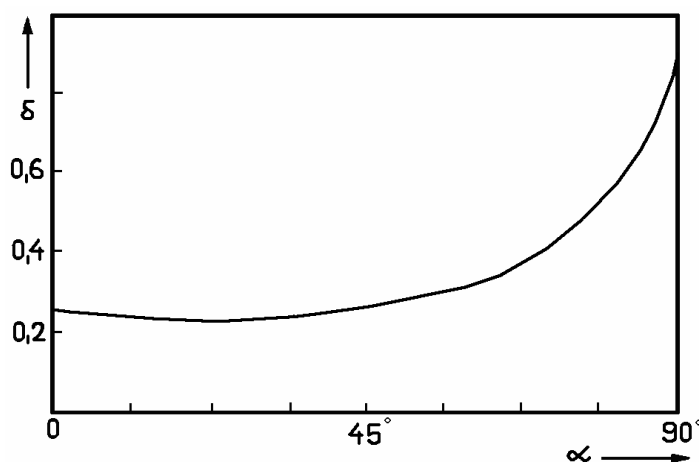
Sekundární elektrony vznikají při pronikání primárních elektronů hmotou jako produkt nepružných srážek. Při ionizaci se uvolňují elektrony z obalu atomů a mají-li dostatečnou energii, mohou se ve vzorku pohybovat. Protože se však jejich pohyb přitom rychle zpomaluje, mohou uniknout ze vzorku jen v případě, že nejsou generovány hlouběji než v jisté maximální hloubce, kterou označíme d_s . Maximální hloubku pronikání primárních elektronů označíme d_p . Pro posouzení účinnosti sekundární emise elektronů se zavádí koeficient δ , který je definován jako poměr počtu sekundárních elektronů emitovaných z povrchu vzorku k počtu primárních dopadajících elektronů.

$$\delta = \frac{I_{SE}}{I_{PE}} > 1 \quad (4)$$

- δ je poměr počtu I_{SE} sekundárních elektronů emitovaných z povrchu vzorku k počtu I_{PE} primárních dopadajících elektronů

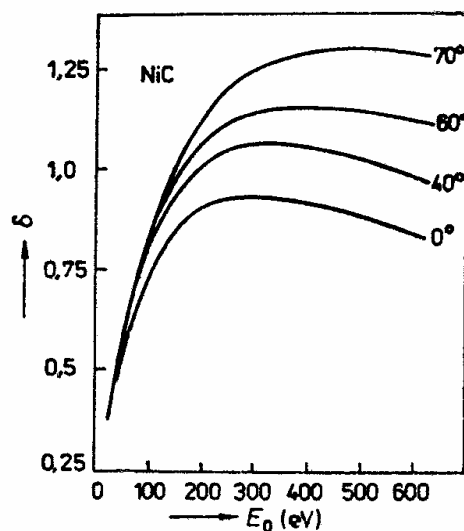
Je-li energie primárních elektronů tak nízká, že platí $d_p < d_s$, koeficient δ poroste s energií primárních elektronů. Bude-li $d_p > d_s$, bude koeficient δ růst nebo klesat s energií primárních elektronů podle toho, zda účinný průřez pro nepružný rozptyl s energií roste nebo klesá. δ tedy bude zpočátku vzrůstat a po dosažení maxima při určitém urychlovacím napětí bude opět klesat.

Velký vliv na velikost proudu sekundárních elektronů má úhel dopadu primárních elektronů. S rostoucím úhlem dopadu (počítá se úhel α mezi paprskem primárních elektronů a normálou povrchu) se zvyšuje množství sekundárních elektronů generovaných dostatečně blízko pod povrchem. Tento jev je výraznější při vysokých urychlovacích napětích.



Obr. 9: Závislost koeficientu emise SE na úhlu dopadu primárních elektronů

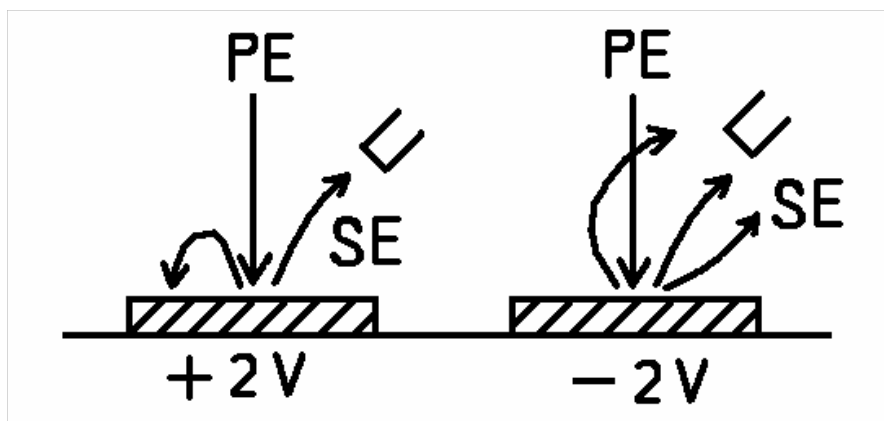
Závislost koeficientu δ na úhlu dopadu a urychlovacím napětí pro karbid niklu je znázorněna na obr. 10. Prováděly se také pokusy, jejichž cílem bylo určit dobu potřebnou pro vznik sekundární emise. Ukázalo se, že tato doba je menší než $5 \cdot 10^{-11}$ s.



Obr. 10: Závislost koeficientu emise sekundárních elektronů na energii primárních elektronů při různých úhlech dopadu (měřeno na NiC).

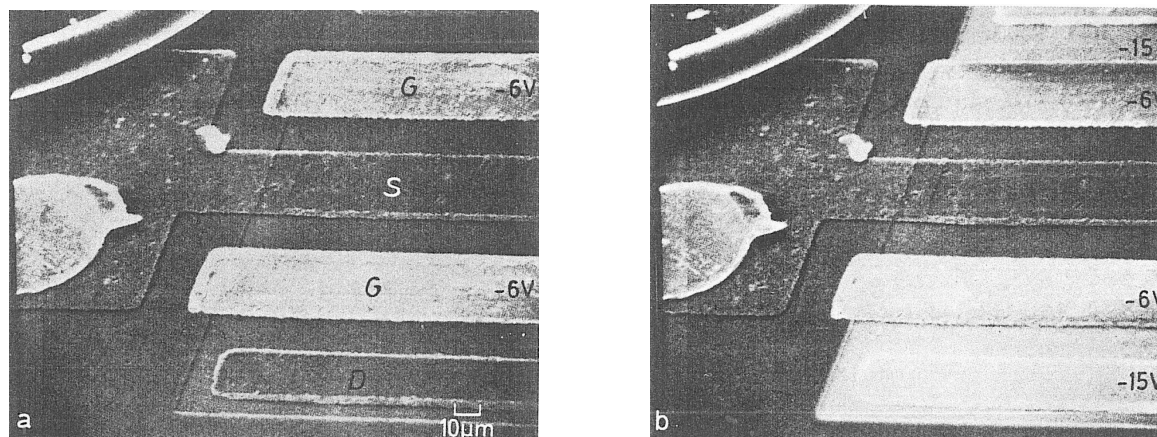
2.5 Princip napět'ového kontrastu

Metoda napět'ového kontrastu vychází z možnosti zviditelňování elektrických polí na površích materiálů a součástek. Při dopadu PE primárních elektronů na povrch elektricky vodivého (polovodivého) materiálu, který je přepojen na určité napětí, dochází k přitahování případně odpuzování emitovaných sekundárních elektronů. Záleží na polaritě napětí, které je na materiál připojeno, jak je znázorněno na obr. 11.



Obr. 11: Princip napět'ového kontrastu

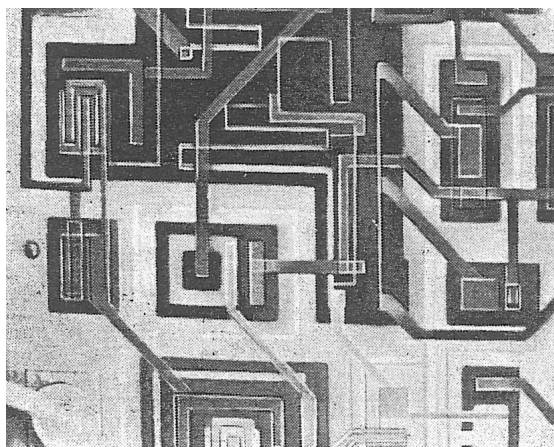
Na první materiál je znázorněno připojení napětí kladného, které způsobí, že část emitovaných sekundárních elektronů je přitažena zpět ke vzorku, místo se v obraze SE jeví jako tmavé. Na druhý materiál je připojeno napětí záporné, které usnadní emisi SE, více SE se dostane k detektoru a místo se jeví jako světlé. Příklady napět'ového kontrastu jsou znázorněny na obr. 12.



Obr. 12: Napět'ový kontrast na MOS-FET tranzistoru [3] a) napětí na gate je -6V b) napětí na drain je -15V

Z obrázků lze usoudit, že místa připojená na záporné napětí G – gate (hradlo) a S – souce (emitor) jsou světlejší, než místa na kladnějším potenciálu.

Dalším příkladem uplatnění napět'ového kontrastu je zobrazení integrovaného obvodu na obr. 13.



Obr. 13: Zobrazení integrovaného obvodu v napět'ovém kontrastu

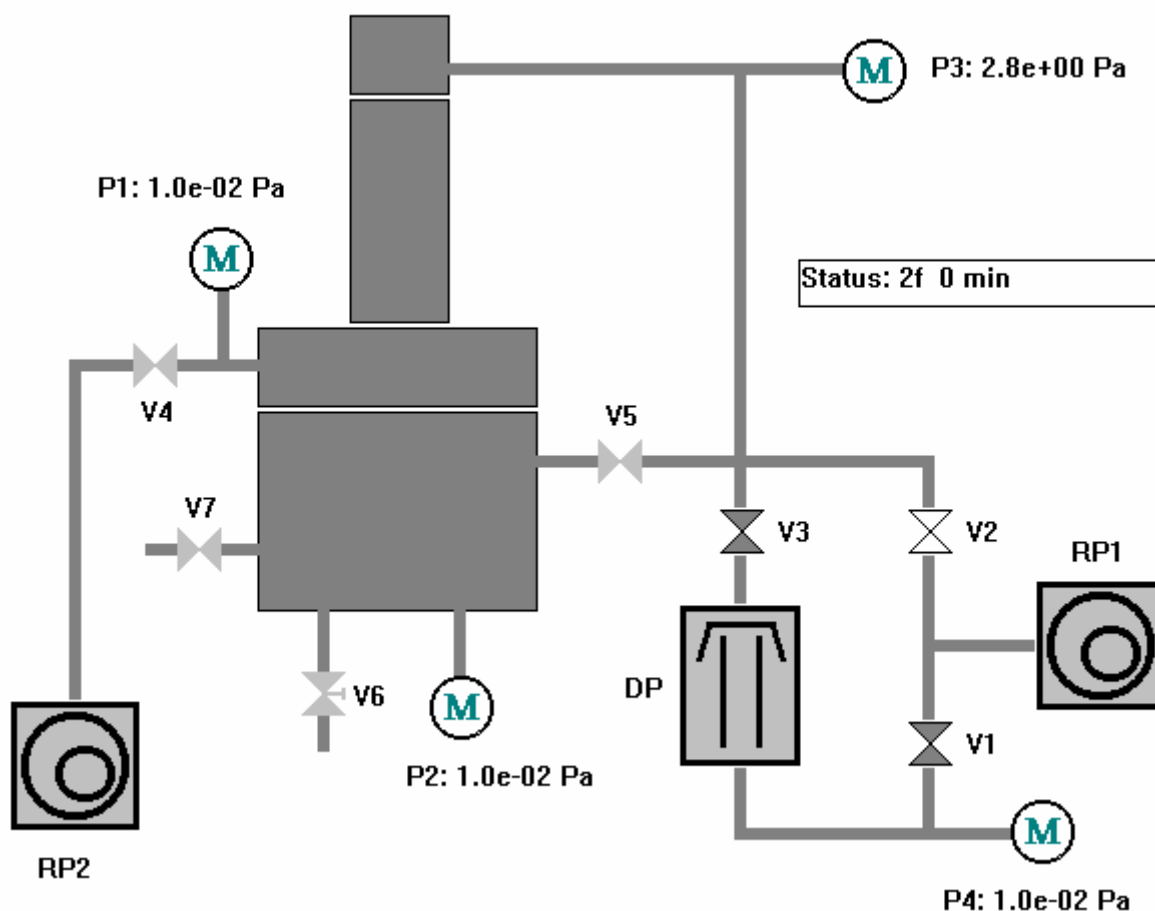
3. Praktická část

3.1 Cíl praktické části

Cílem zadání praktické části bakalářské práce bylo sledování rozložení elektrického pole na povrchu polovodičové součástky a navržení vhodných pracovních podmínek pro pozorování napětového kontrastu v environmentálním mikroskopu pomocí scintilačního detektoru sekundárních elektronů.

3.2 Popis měřicího zařízení a jeho nastavení

Měření praktické části bakalářské práce proběhlo na Ústavu přístrojové techniky AV/ČR pomocí elektronového mikroskopu Aquasem, který je vyroben firmou TESCAN Bruo, sro. Přístroj má k dispozici PC s originálním programem firmy TESCAN, který se používá na ovládání a záznam obrazu. Jako zdroj elektronů v elektronovém mikroskopu je použito přímo žhavené wolframové vlákno. Urychlovací napětí je možno volit v rozsahu 10 až 20 kV. K přístroji jsou připojeny dva typy detektorů. První je ionizační a novější je scintilační detektor SE. Vakuové schéma mikroskopu je na obr. 14.



Obr. 14: RP1,RP2 – rotační vývěvy, DP – difuzní vývěva, V1 až V7 – vakuové ventily.

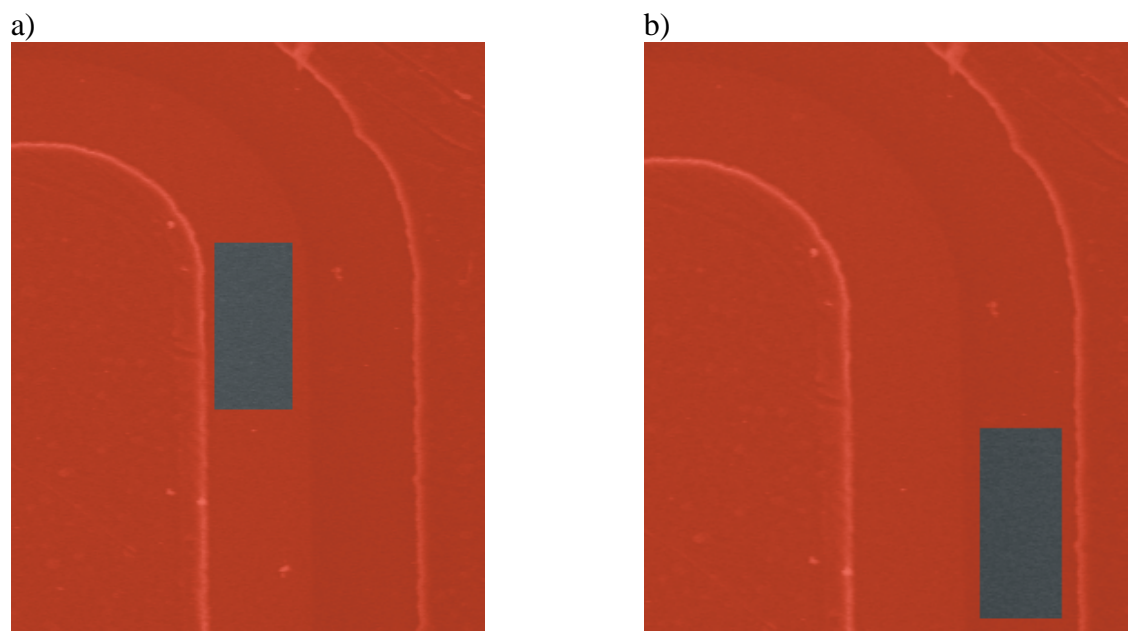
Před měřením se musí nastavit pracovní prostředí v komoře vzorku, aby byly ideální podmínky pro měření. Nejprve se musí umístit vzorek na držák, který se dá do komory vzorku. Nastavíme vzdálenost vzorku od clony C2 tzv. pracovní vzdálenost vzorku. Tato vzdálenost byla nastavena na 4 mm a zůstávala stejná pro všechna měření. Pomocí rotačních vývěv RP1, RP2 a difúzní vývěvy se mikroskop vakuově čerpá. Ventil číslo 7 se používá k připouštění vodních par do komory vzorku. Pro dosažení ideálních podmínek je nutné opakovat připouštění vodních par a následné odčerpání komory vzorku, aby došlo k vytvoření prostředí nasycených vodních par v komoře vzorku. Cyklus připouštění vodních par a následného odčerpání komory vzorku v rozmezí tlaků 800 Pa až 100 Pa byl pro dosažení optimálních podmínek měření opakován minimálně 6x.

3.3 Vzorek

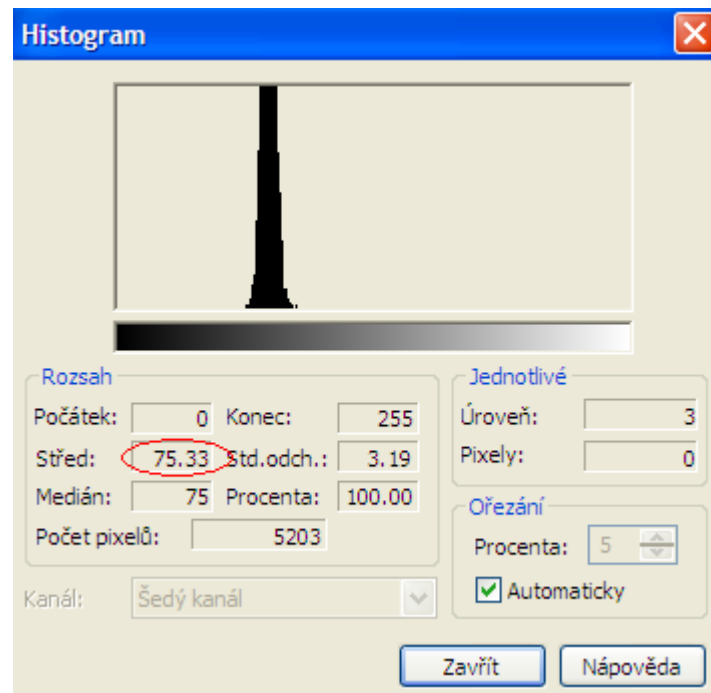
K měření praktické části byl použit křemíkový výkonový tranzistor typu PNP. Sledován byl přechod emitor báze zapojený v závěrném směru při napětí 10 V.

3.4 Popis zpracování naměřených hodnot

Pro vyhodnocování byl použit program Corel PHOTO-PAINT X3. Tento program umožňuje vytvoření masky, která vymezuje vybranou oblast. Pomocí volby histogram program vypočítá střední hodnotu úrovně šedi z oblasti, která není překryta maskou. Je nutné vymezit oblast s co nejmenším počtem poruch a nečistot, aby nebyl větší rozdíl rozptylu střední hodnoty úrovně šedi. Výběrem vhodné masky se dosáhne i potlačení vlivu parazitních kontrastů.



Obr. 15: Vymezení oblasti pro vypočítání střední hodnoty úrovně šedi a) oblast Φ_S pro stanovení střední hodnoty úrovně šedi ve světlé části obrazu a b) oblast Φ_T pro stanovení střední hodnoty úrovně šedi v tmavé části obrazu s kladným potenciálem.



Obr. 16: Histogram pro určení střední hodnoty úrovně šedi

4. Výsledky měření

4.1 Měření pomocí ionizačního detektoru

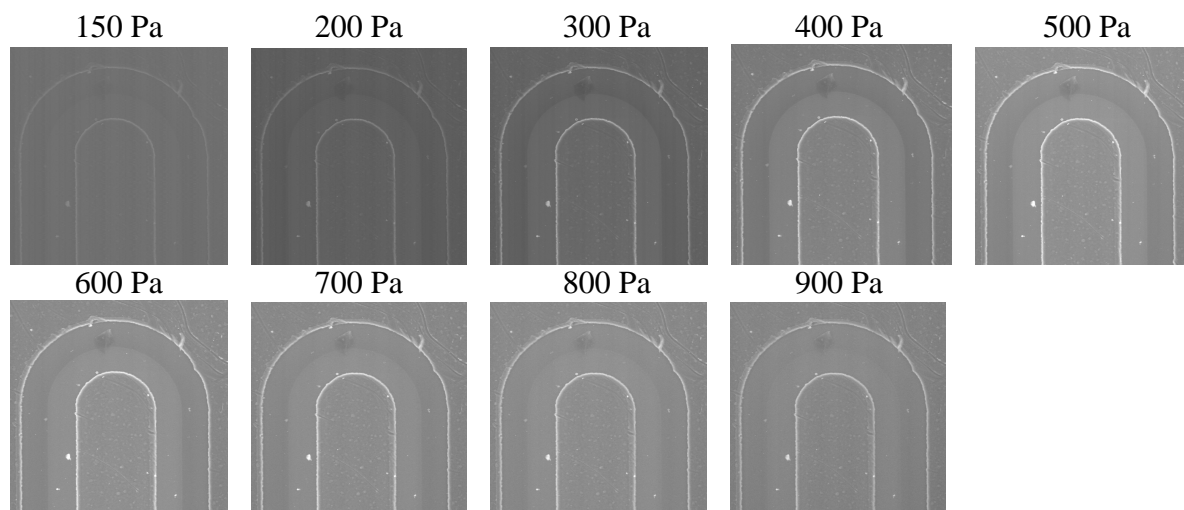
V první části měření jsem proměřoval změnu velikosti napětového kontrastu definovaného vztahem $k = \Phi_s - \Phi_T$, kde k je kontrast, Φ_s je střední hodnota úrovně šedi ve světlé oblasti a Φ_T je střední hodnota úrovně šedi ve tmavé oblasti, při různých tlacích vodních par v komoře vzorku pomocí ionizačního detektoru. Tlak v komoře jsem nastavoval od 150 do 900 Pa. Vzorkem byl výkonový tranzistor, napětový kontrast byl sledován na přechodu emitor – báze orientovaném v závěrném směru, napětí 10 V.

Nastavení mikroskopu a ionizačního detektoru bylo následovné:

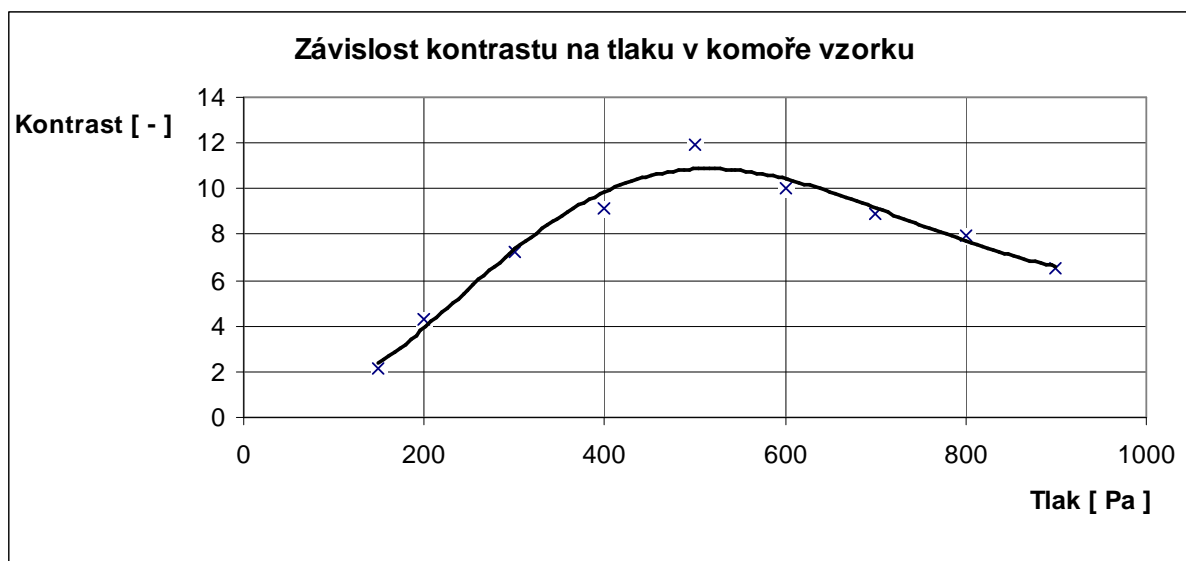
- napětí na detektoru 400V
- zvětšení obrazu 742x
- pracovní vzdálenost vzorku 4mm
- urychlovací napětí 20kV
- proud primárního svazku 100pA
- napětí na dynodách fotonásobiče 800 V
- rastrovací rychlost slow 2
- tlak vodních par v komoře vzorku $p = 150$ až 900 Pa

tlak	Φ_s	Φ_T	kontrast
[Pa]	[-]	[-]	[-]
150	112,55	110,37	2,18
200	96,54	92,28	4,26
300	104,52	97,25	7,27
400	75,29	66,12	9,17
500	146,76	134,84	11,92
600	146,01	136,01	10,00
700	142,5	133,59	8,91
800	143,21	135,22	7,99
900	135,25	128,73	6,52

Tab. 1. Hodnoty střední úrovně šedi a kontrastu pro jednotlivé kroky v komoře vzorku



Obr. 17: Napěťový kontrast na výkonovém tranzistoru pozorovaný pomocí ionizačního detektoru



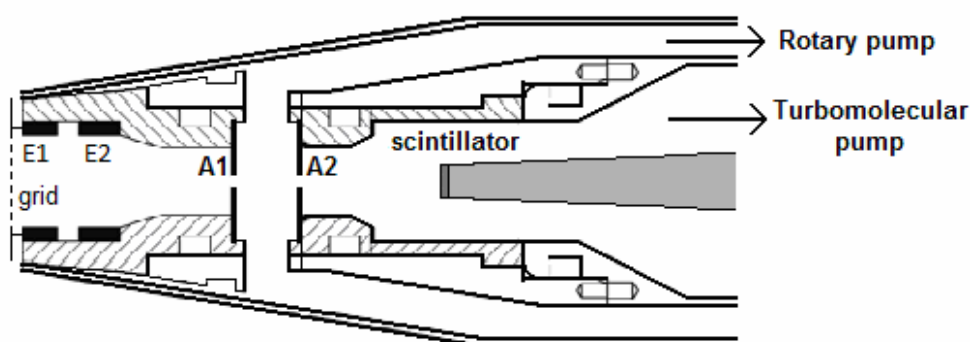
Obr. 18: Graf závislosti kontrastu na tlaku v komoře vzorku při detekci ionizačním detektorem. Napětí na detektoru 400 V.

Vhodné podmínky pro měření kontrastu pomocí ionizačního detektoru lze stanovit z grafu. Nejvyšší kontrast byl zjištěn při tlaku vodních par v okolí 500 Pa.

4.2 Měření pomocí scintilačního detektoru

4.2.1 Scintilační detektor pro detekci SE v EREM

Detektor obsahuje tři části s různým tlakem. Před clonou A1 je tlak stejný jako v komoře vzorku. Druhá část je mezi clonami A1 a A2. Ta je čerpána rotační vývěvou a za clonou A2 je prostor se scintilátorem, který je čerpán turbomolekulární vývěvou. Tlak v prostoru scintilátoru nesmí převýšit 5 Pa, aby nedocházelo k výbojům plynu, při přiložení napětí na scintilátor 8 až 10 kV. Elektrodotový systém detektoru je tvořen mřížkou, která je vodivě spojena s elektrodou E1, elektrodou E2 a clonami A1 a A2. Vhodná napětí přiložená na soustavu elektrod umožňují průchod sekundárních elektronů z komory vzorku ke scintilátoru. Napětí 8 až 10 kV na scintilátoru urychlí sekundární elektrony, které získají potřebnou energii pro vybuzení scintilací.



Obr. 19: Principiální schéma scintilačního detektoru pro detekci SE

Vzhledem k tomu, že nastavení mikroskopu i detektoru se při měřeních poněkud lišilo pro oblast nižších a vyšších tlaků (od cca 300 Pa v komoře vzorku), jsou měření a výsledky uvedeny samostatně v kap. 4.2.2 a 4.2.3.

Měření byla opět prováděna na výkonovém tranzistoru, kontrast byl vyhodnocován na přechodu emitor – báze, orientovaném v závěrném směru při napětí 10 V.

4.2.2 Měření pro nižší tlak

Nastavení mikroskopu:

- pracovní vzdálenost vzorku 4mm
- urychlovací napětí 20kV
- proud primárního svazku 100pA
- napětí na dynodách fotonásobiče 800 V
- rastrovací rychlost slow 2
- tlaky vodních par v komoře vzorku $p = 50$ až 300 Pa
- zvětšení obrazu 750x

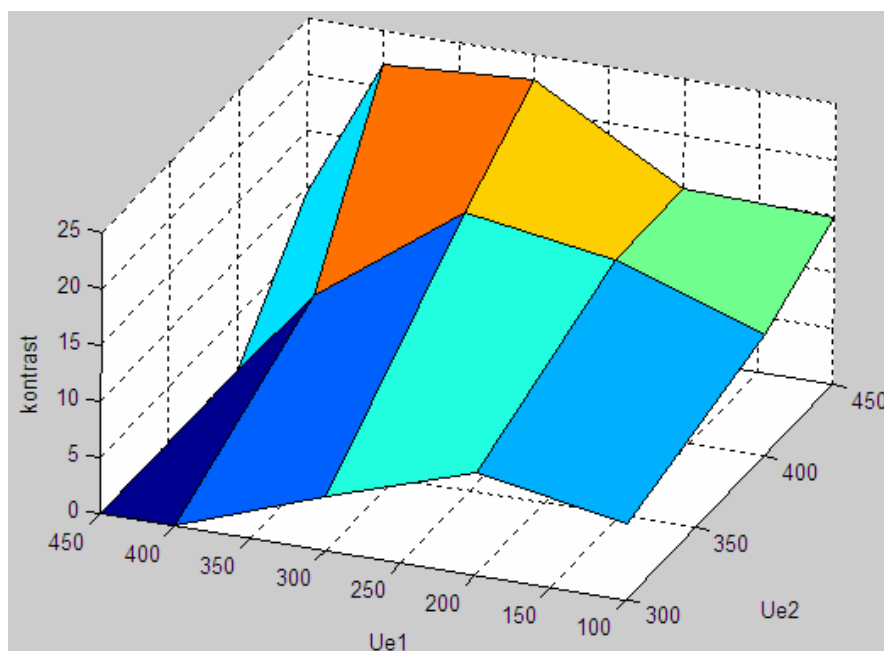
Nastavení scintilačního detektoru:

- napětí na první elektrodě a mřížce $U_{E1} = 100$ až 450 V (E1)
- napětí na druhé elektrodě $U_{E2} = 300$ až 450 V (E2)
- napětí na první cloně $U_{C1} = 550$ V (A1)
- napětí na druhé cloně $U_{C2} = 1000$ V (A2)

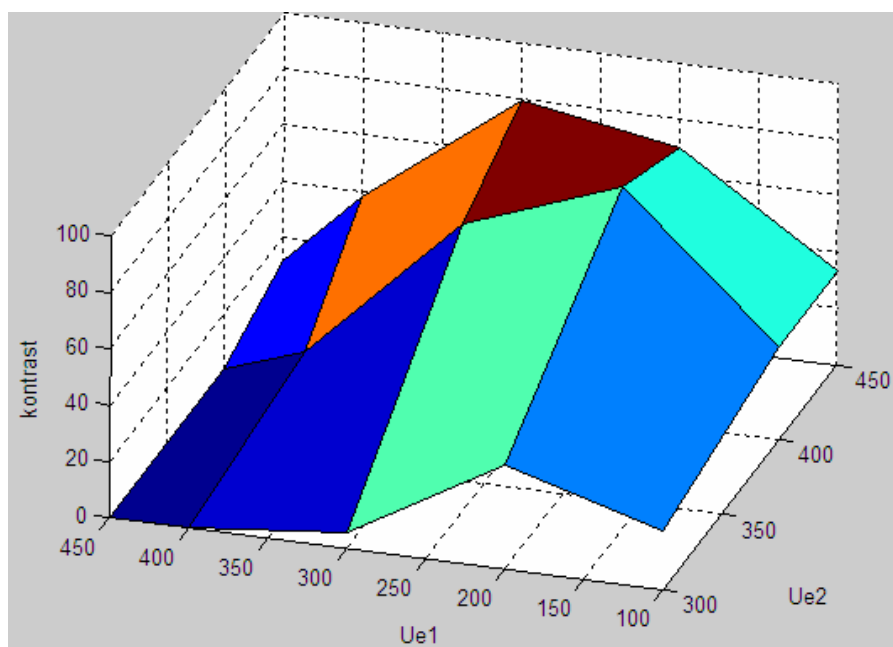
V první části měření pomocí scintilačního detektoru jsem proměřoval závislost kontrastu na tlaku při proměnném nastavení napětí na elektrodách. Tlak v komoře vzorku jsem měnil od 50 do 300 Pa a napětí na první elektrodě jsem měnil v rozmezí od 100 do 450 V (E1). Na druhé elektrodě jsem napětí měnil v rozmezí od 300 do 450 V (E2). Cílem bylo zjistit optimální podmínky pro získání napěťového kontrastu při detekci signálu scintilačním detektorem.

Číselné hodnoty pro vypočítání kontrastu byly vyhodnoceny ze snímků přechodu emitor – báze pomocí programu Corel PHOTO-PAINT X3. Nejprve jsme vytvořili masku pro světlejší část šedé, která nám vymezuje vybranou oblast a pomocí histogramu jsme zjistili střední hodnotu úrovně šedi pro světlou část. To samé jsme provedli i s tmavou částí obrázku. Hodnoty jsme pak použili pro výpočet kontrastu. Tabulky se stanovenými hodnotami úrovně šedi pro jednotlivé oblasti tranzistoru a kontrastu jsou uvedeny v příloze P1, stejně jako snímky tranzistoru, ze kterých byly úrovně šedi počítány.

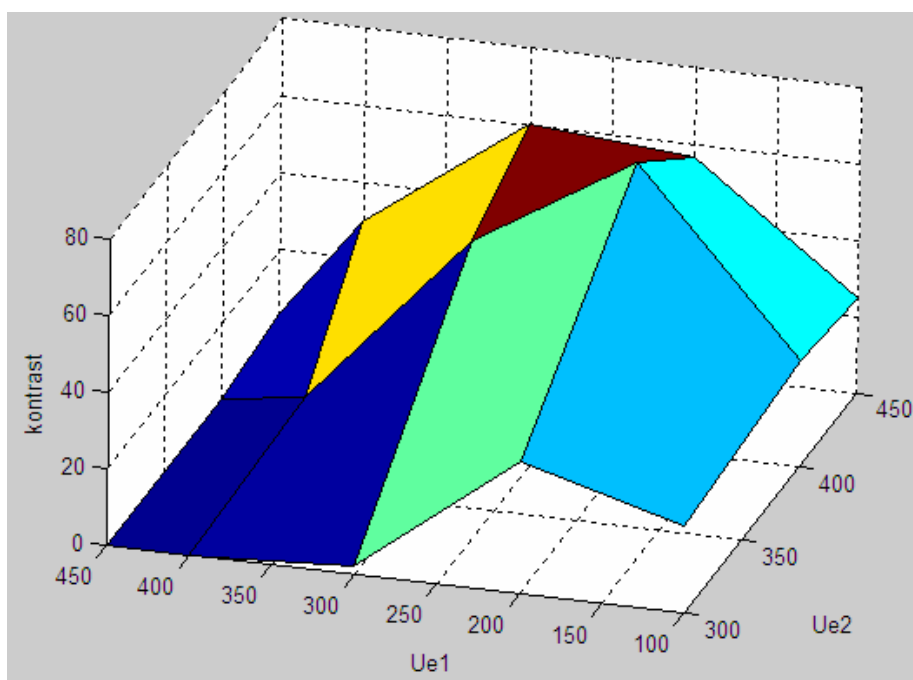
Na obr. 20 až 25 jsou zobrazeny závislosti kontrastu na napětích na elektrodách detektoru pro konstantní hodnoty tlaku.



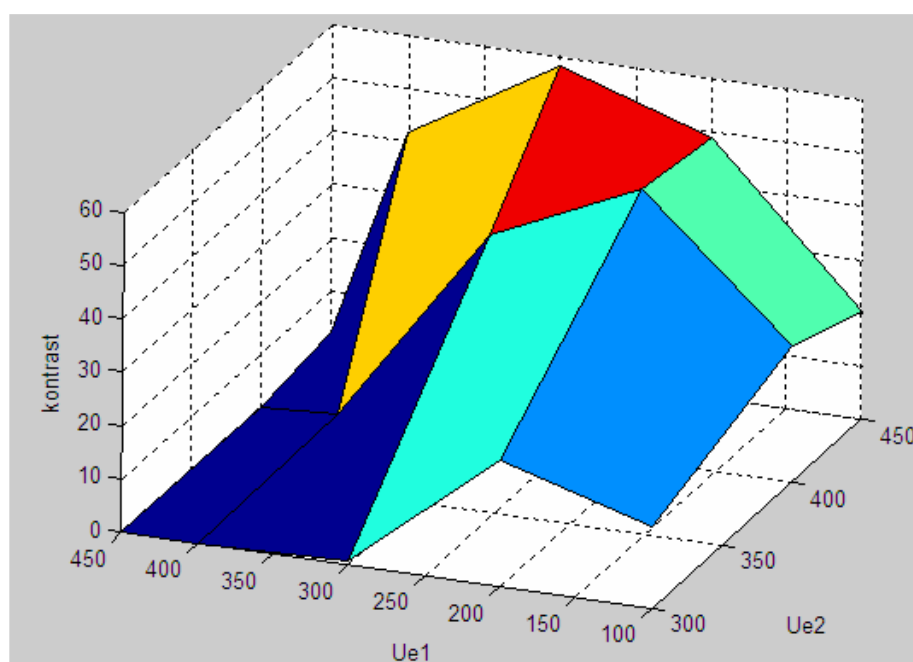
Obr. 20: Závislost kontrastu na napětí na elektrodách při konstantním tlaku vodních par 50 Pa. Nastavované hodnoty napětí elektrod $U_{E1} = 100, 200, 300, 400, 450$ V, $U_{E2} = 300, 400, 450$ V.



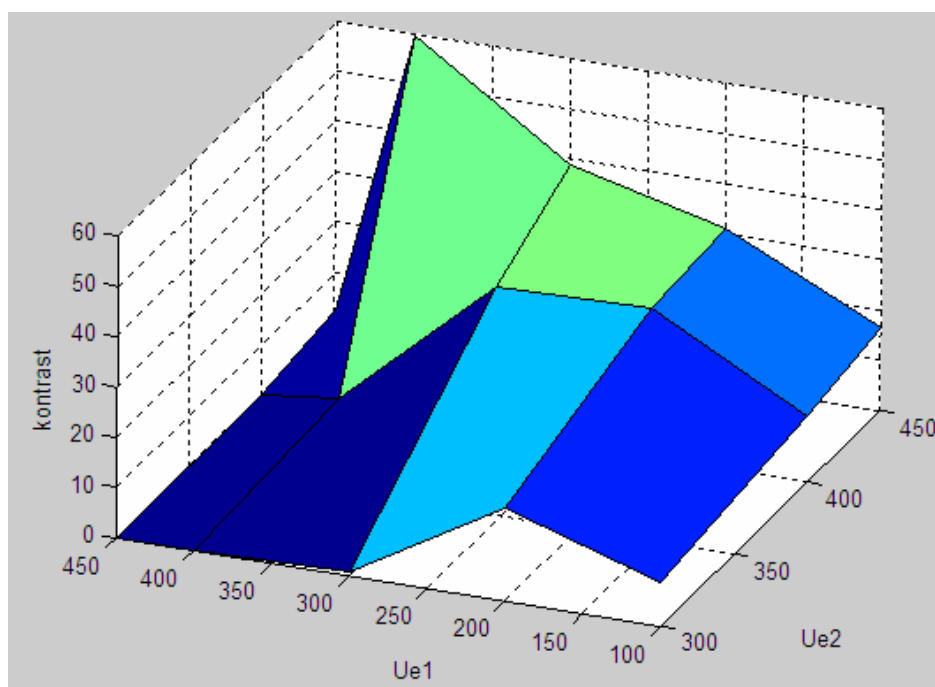
Obr. 21: Závislost kontrastu na napětí na elektrodách při konstantním tlaku vodních par 100 Pa. Nastavované hodnoty napětí elektrod $U_{E1} = 100, 200, 300, 400, 450$ V, $U_{E2} = 300, 400, 450$ V.



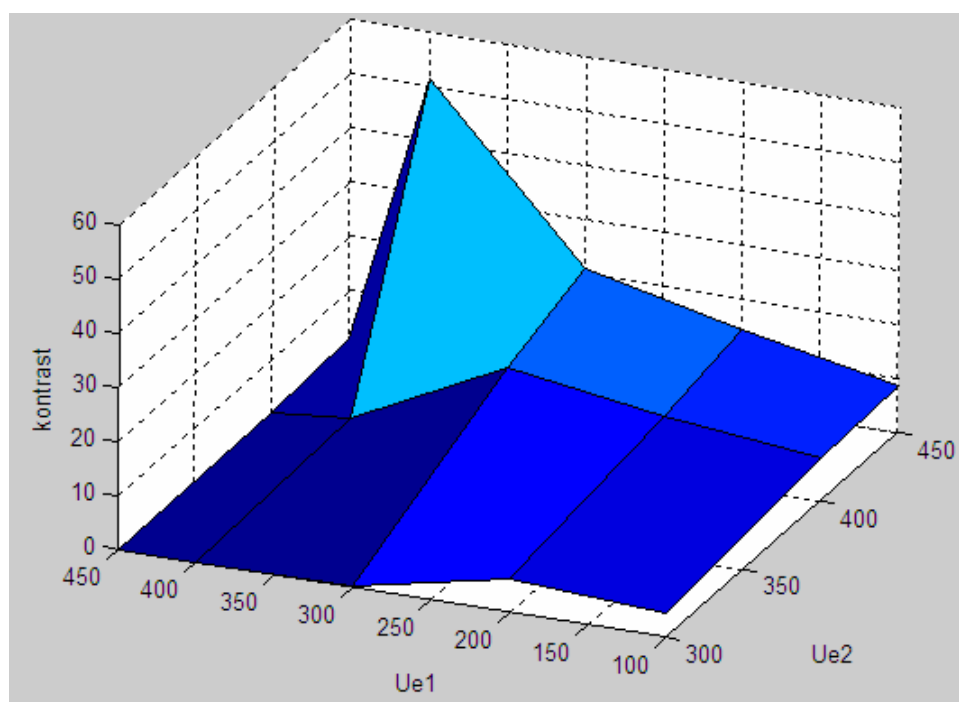
Obr. 22: Závislost kontrastu na napětí na elektrodách při konstantním tlaku vodních par 150 Pa. Nastavované hodnoty napětí elektrod $U_{E1} = 100, 200, 300, 400, 450$ V, $U_{E2} = 300, 400, 450$ V.



Obr. 23: Závislost kontrastu na napětí na elektrodách při konstantním tlaku vodních par 200 Pa. Nastavované hodnoty napětí elektrod $U_{E1} = 100, 200, 300, 400, 450$ V, $U_{E2} = 300, 400, 450$ V.

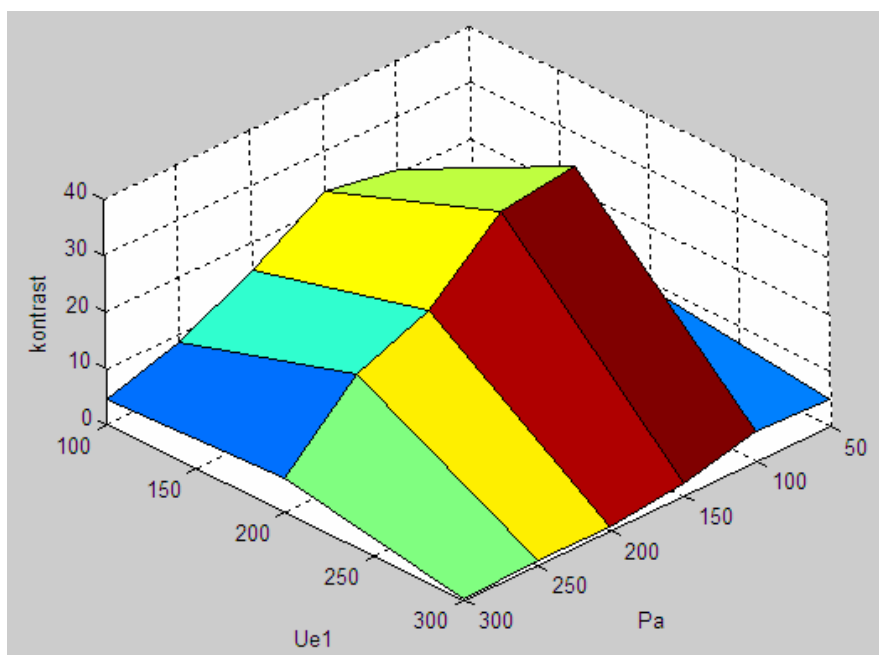


Obr. 24: Závislost kontrastu na napětí na elektrodách při konstantním tlaku vodních par 250 Pa. Nastavované hodnoty napětí elektrod $U_{E1} = 100, 200, 300, 400, 450$ V, $U_{E2} = 300, 400, 450$ V.

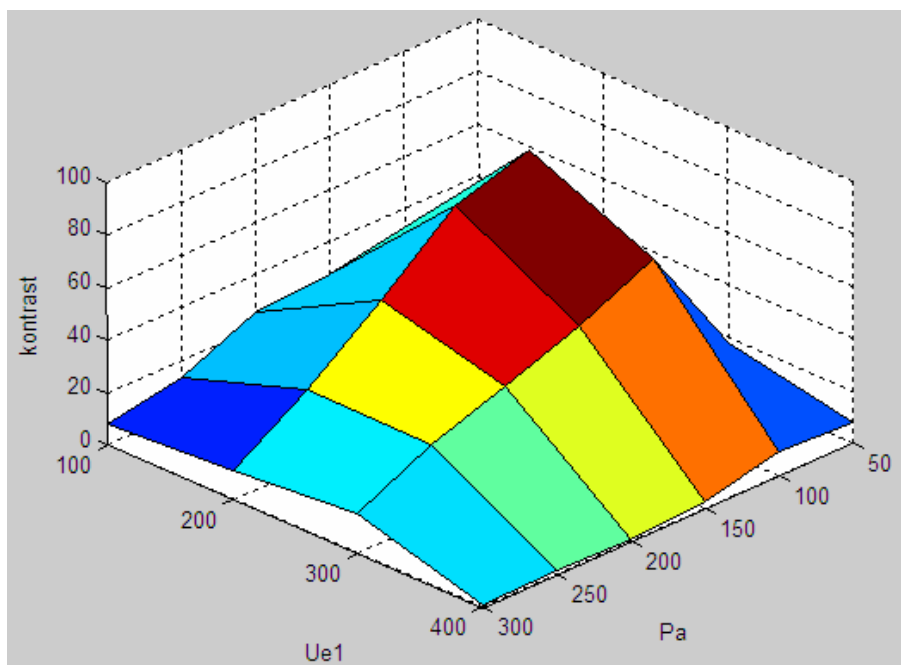


Obr. 25: Závislost kontrastu na napětí na elektrodách při konstantním tlaku vodních par 300 Pa. Nastavované hodnoty napětí elektrod $U_{E1} = 100, 200, 300, 400, 450$ V, $U_{E2} = 300, 400, 450$ V.

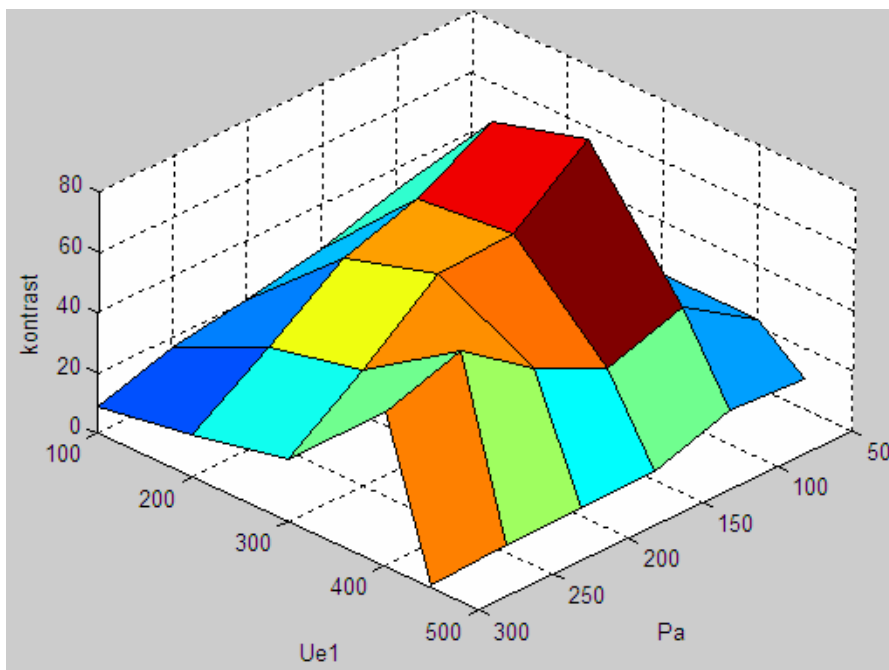
Na obr. 26 až 28 jsou zobrazeny závislosti kontrastu na tlaku vodních par při proměnném napětí na první elektrodě a konstantním napětí na elektrodě druhé.



Obr. 26: Závislost kontrastu na tlaku vodních par při proměnném napětí na první elektrodě a při konstantním napětí na druhé elektrodě $U_{E2} = 300$ V.



Obr. 27: Závislost kontrastu na tlaku vodních par při proměnném napětí na první elektrodě a při konstantním napětí na druhé elektrodě $U_{E2} = 400$ V.



Obr. 28: Závislost kontrastu na tlaku vodních par při proměnném napětí na první elektrodě a při konstantním napětí na druhé elektrodě $U_{E2} = 450 \text{ V}$.

Z obr. 20 až 25 pro konstantní hodnoty tlaku vodních par v komoře vzorku lze usoudit, že nejvyšších hodnot kontrastu lze dosáhnout pro napětí na druhé elektrodě $E2$ 450V. Vhodné napětí na první elektrodě $E1$ je pro dosažení maximálního kontrastu potřebné udržovat v rozmezí 200 až 400V, konkrétní hodnota napětí na této elektrodě závisí na tlaku v komoře vzorku.

Ze závislostí vynesných na obr. 26 až 28 je patrné, že nejvyššího kontrastu lze dosáhnout při tlaku vodních par v komoře vzorku v rozmezí 100 až 150 Pa, dále s rostoucím tlakem kontrast klesá.

4.2.3 Měření pro vyšší tlak

Nastavení mikroskopu:

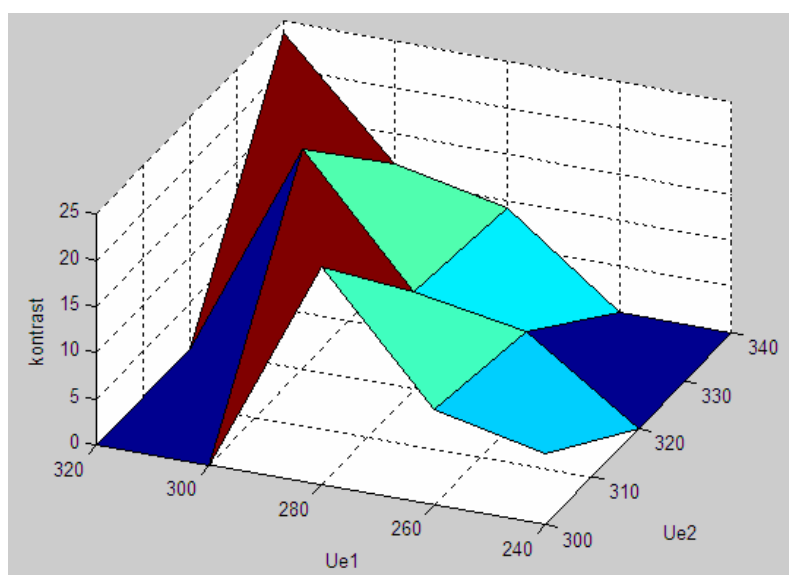
- pracovní vzdálenost vzorku 4mm
- urychlovací napětí 20kV
- proud primárního svazku 100pA
- napětí na dynodách fotonásobiče 700 V
- rastrovací rychlost slow 2
- tlaky vodních par v komoře vzorku $p = 300$ až 600 Pa
- zvětšení obrazu 600x

Nastavení parametrů scintilačního detektoru:

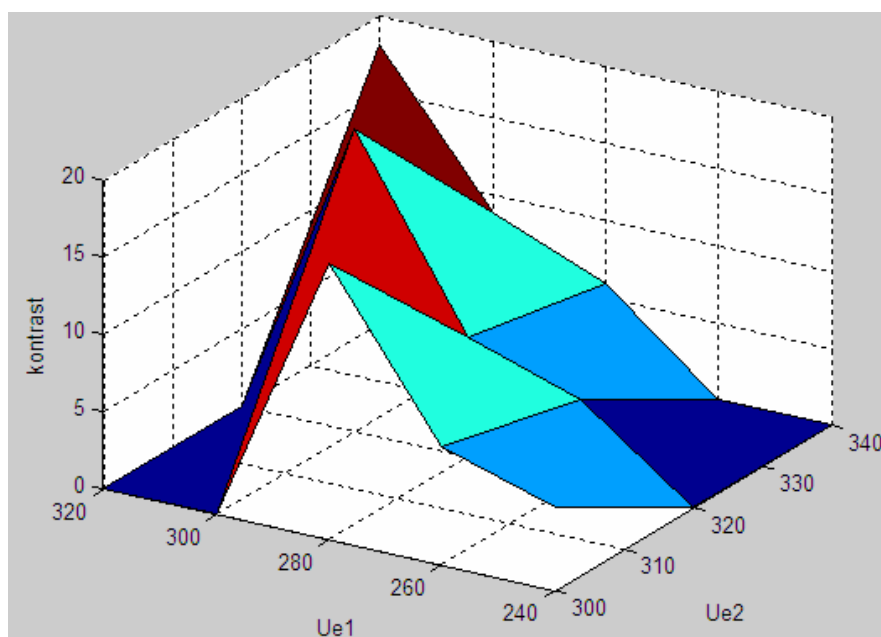
- napětí na první elektrodě a mřížce $U_{E1} = 240$ až 320 V (E1)
- napětí na druhé elektrodě $U_{E2} = 300$ až 340 V (E2)
- napětí na první cloně $U_{C1} = 520$ V (A1)
- napětí na druhé cloně $U_{C2} = 1000$ V (A2)

V druhé části měření pomocí scintilačního detektoru jsem proměřoval závislost kontrastu na tlaku při proměnném nastavení napětí na elektrodách. Tlak v komoře vzorku jsem měnil od 300 do 600 Pa a napětí na první elektrodě jsem měnil v rozmezí od 240 do 320 V (E1), na druhé elektrodě jsem napětí měnil v rozmezí od 300 do 340 V (E2). Cílem bylo stanovit optimální podmínky pro získání napětíového kontrastu při detekci scintilačním detektorem při vyšších tlacích.

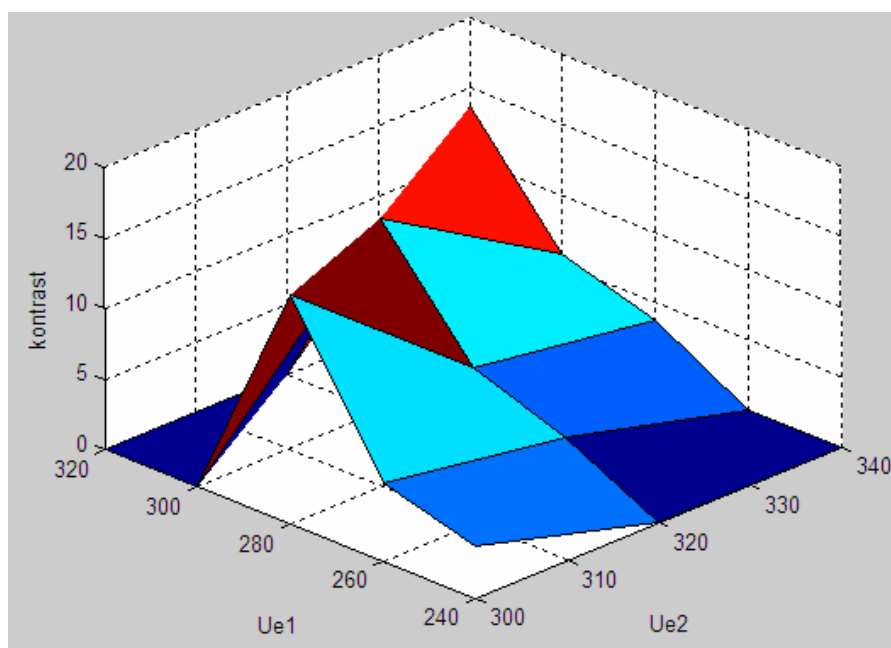
Na obr. 29 až 35 jsou zobrazeny závislosti kontrastu na napětí na elektrodách při konstantním tlaku.



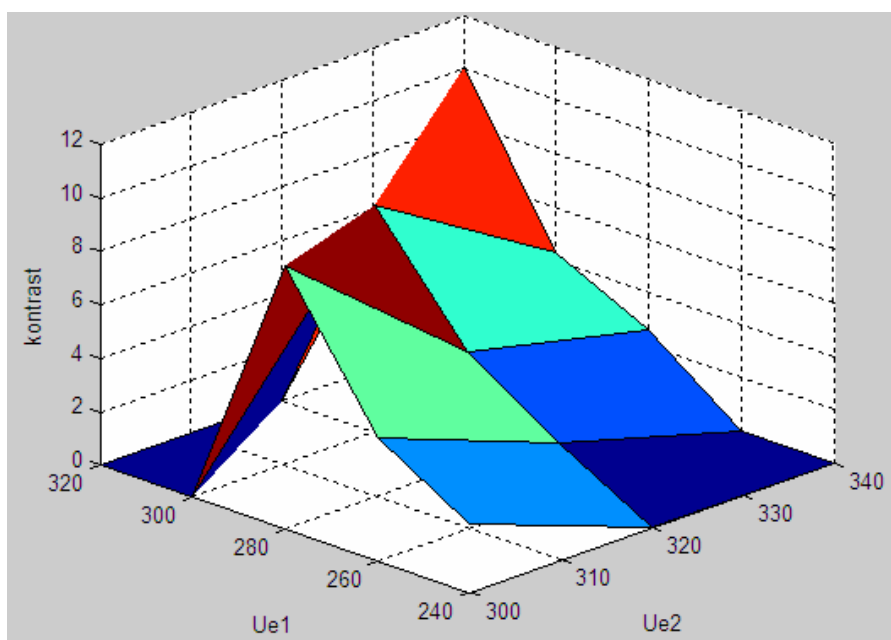
Obr. 29: Závislost kontrastu na napětí na elektrodách při konstantním tlaku 300 Pa. Hodnoty napětí na elektrodách $U_{E1} = 240, 260, 280, 300, 320$ V, $U_{E2} = 300, 320, 340$ V.



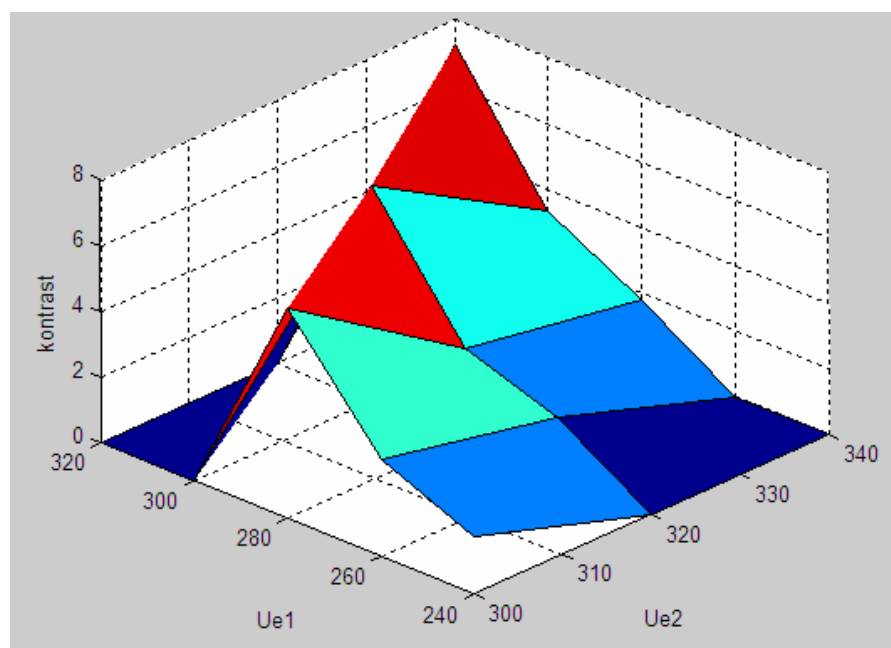
Obr. 30: Závislost kontrastu na napětí na elektrodách při konstantním tlaku 350 Pa. Hodnoty napětí na elektrodách $U_{E1} = 240, 260, 280, 300, 320$ V, $U_{E2} = 300, 320, 340$ V.



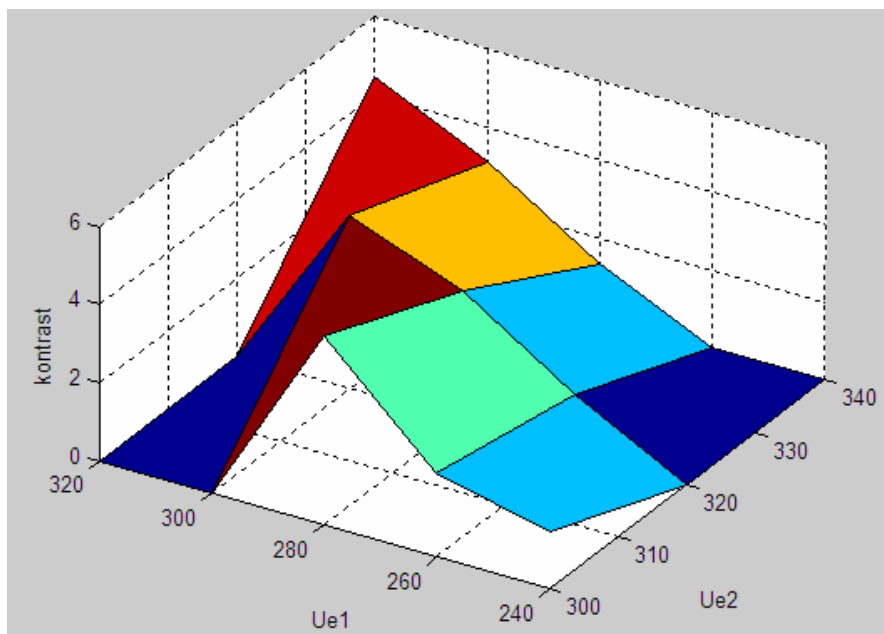
Obr. 31: Závislost kontrastu na napětí na elektrodách při konstantním tlaku 400 Pa. Hodnoty napětí na elektrodách $U_{E1} = 240, 260, 280, 300, 320$ V, $U_{E2} = 300, 320, 340$ V.



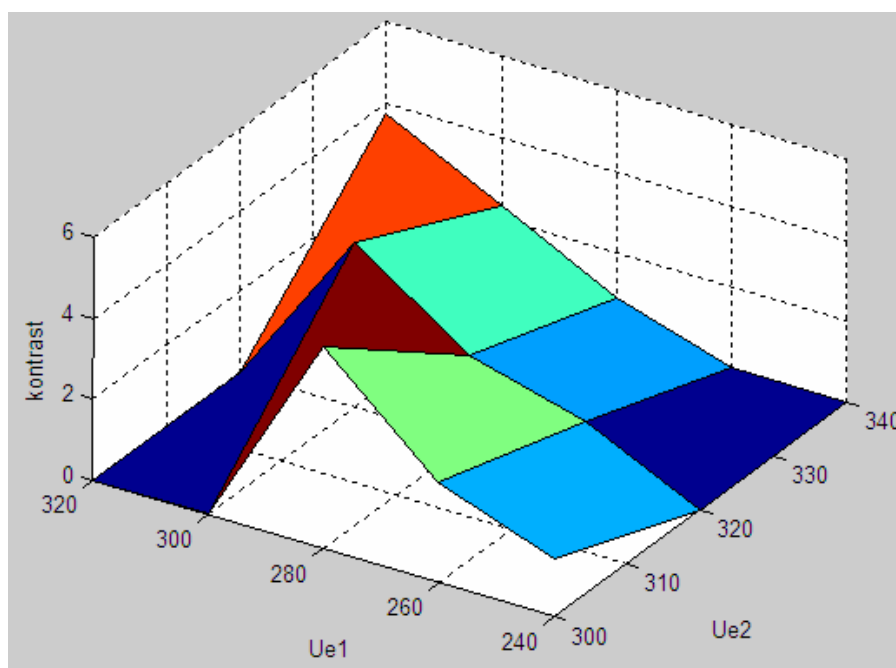
Obr. 32: Závislost kontrastu na napětí na elektrodách při konstantním tlaku 450 Pa. Hodnoty napětí na elektrodách $U_{E1} = 240, 260, 280, 300, 320$ V, $U_{E2} = 300, 320, 340$ V.



Obr. 33: Závislost kontrastu na napětí na elektrodách při konstantním tlaku 500 Pa. Hodnoty napětí na elektrodách $U_{E1} = 240, 260, 280, 300, 320$ V, $U_{E2} = 300, 320, 340$ V.

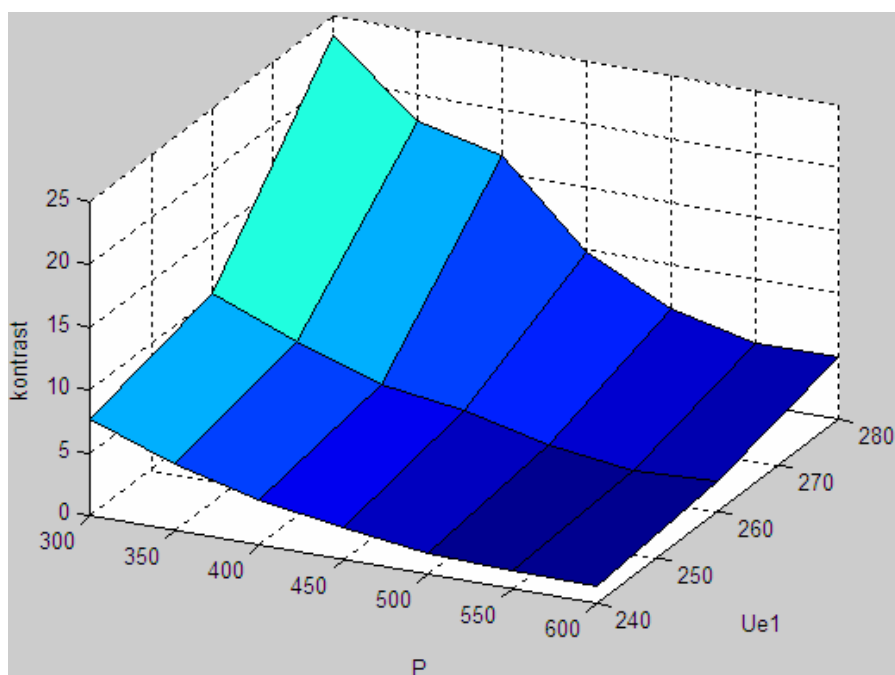


Obr. 34: Závislost kontrastu na napětí na elektrodách při konstantním tlaku 550 Pa. Hodnoty napětí na elektrodách $U_{E1} = 240, 260, 280, 300, 320$ V, $U_{E2} = 300, 320, 340$ V.

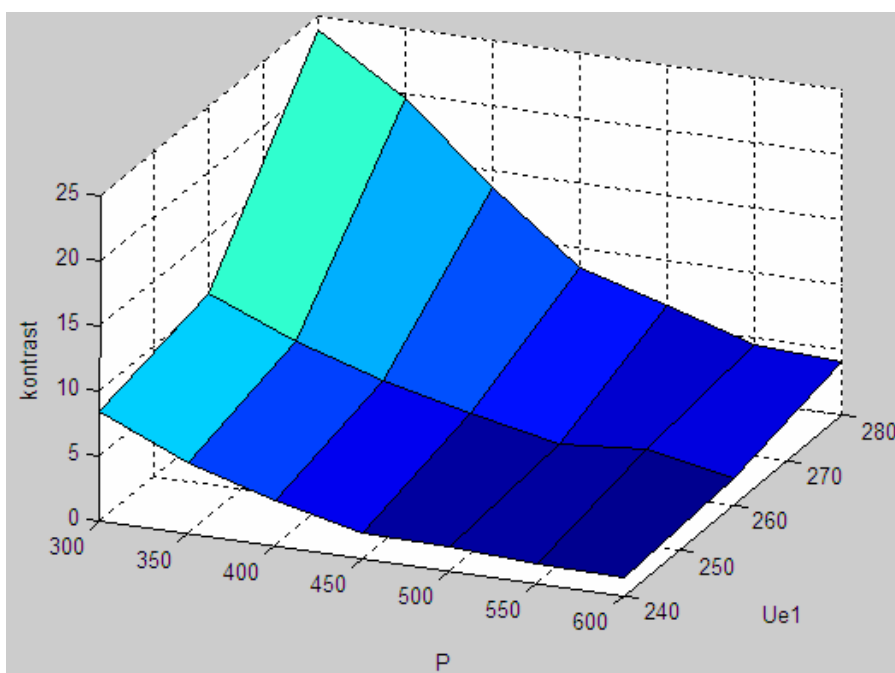


Obr. 35: Závislost kontrastu na napětí na elektrodách při konstantním tlaku 600 Pa. Hodnoty napětí na elektrodách $U_{E1} = 240, 260, 280, 300, 320$ V, $U_{E2} = 300, 320, 340$ V.

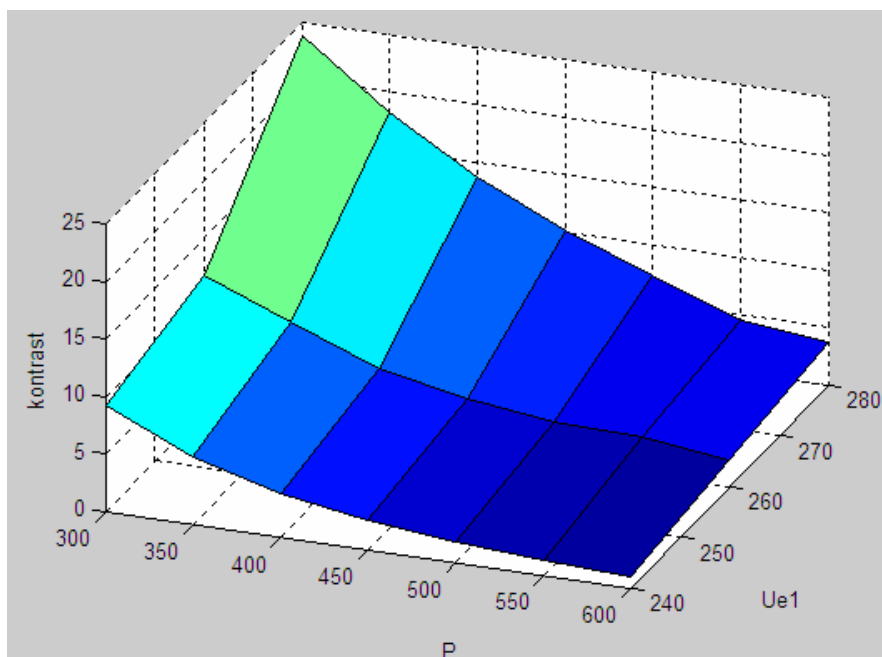
Na obr. 36 až 38 je zobrazena závislost kontrastu na tlaku vodních par při proměnném napětí na první elektrodě a při konstantním napětí na druhé elektrodě.



Obr. 36: Závislost kontrastu na tlaku vodních par při proměnném napětí na první elektrodě a při konstantním napětí na druhé elektrodě $U_{E2} = 300$ V.



Obr. 37: Závislost kontrastu na tlaku vodních par při proměnném napětí na první elektrodě a při konstantním napětí na druhé elektrodě $U_{E2} = 320$ V.



Obr. 38: Závislost kontrastu na tlaku vodních par při proměnném napětí na první elektrodě a při konstantním napětí na druhé elektrodě $U_{E2} = 340$ V.

Z obr. 29 až 35 pro konstantní hodnoty tlaku vodních par v komoře vzorku v rozmezí 300 až 600 Pa lze usoudit, že nejvyšších hodnot kontrastu lze dosáhnout pro napětí na druhé elektrodě $E2$ 340V. Napětí na první elektrodě by mělo být o 20 V nižší, vhodná napětí na první elektrodě se pohybují v rozmezí od 280 do 320 V v závislosti na tlaku vodních par. Napětí na první elektrodě větší než 320 V vedlo ke ztrátě signálu. Při napětí na druhé elektrodě nad 340 V se detektor stával nestabilní.

Ze závislostí vynesných na obr. 36 až 38 je patrné, že s rostoucím tlakem nad 300 Pa hodnota kontrastu klesá.

5. Závěr

Na začátku bakalářské práce popisují teorii potřebnou k pochopení problematiky, činnosti environmentálního rastrovacího elektronového mikroskopu (EREM), jeho vakuové soustavy, detekci signálů a napětového kontrastu.

Cílem bakalářské práce bylo experimentálně stanovit vhodné pracovní podmínky pro pozorování napětového kontrastu v environmentálním mikroskopu pomocí scintilačního detektoru sekundárních elektronů.

V první části experimentů se zjišťovaly vhodné podmínky pro dosažení maximálního kontrastu při detekci signálu scintilačním detektorem sekundárních elektronů pro tlaky v komoře vzorku v rozmezí 50 až 300 Pa. Z vyhodnocených závislostí vyplývá, že napětový kontrast je největší při tlaku vodních par 100 Pa a s rostoucím tlakem klesá. Napětí na první elektrodě pro dosažení co největšího napětového kontrastu by mělo být v rozmezí 200 až 300 V, napětí na druhé elektrodě 450 V. Rostoucí napětí na druhé elektrodě přináší i větší napětový kontrast, napětí na druhé elektrodě musí být vždy větší než napětí na elektrodě první.

V druhé části experimentů se zjišťovaly vhodné podmínky pro dosažení maximálního kontrastu v rozmezí tlaků 300 až 600 Pa v komoře vzorku. Z vyhodnocených závislostí vyplývá, že napětový kontrast je největší opět pro nejnižší hodnotu tlaku 300 Pa a s rostoucím tlakem klesá. Napětí na první elektrodě pro dosažení co největšího napětového kontrastu by mělo být v rozmezí 280 až 320 V, napětí na druhé elektrodě 340 V. Při větších hodnotách než 320 V na první elektrodě byl obraz nestabilní a docházelo ke ztrátě signálu.

Pro porovnání jsem měření napětového kontrastu provedl i pro ionizační detektor. U tohoto detektoru bylo dosaženo největšího napětového kontrastu při tlacích vodních par v komoře vzorku v rozmezí 400 až 600 Pa.

6. Seznam literatury

[1] Hulínský, V.; Jurek, K.: Zkoumání látek elektronovým paprskem. Praha; SNTL, 1982, 401 s.

[2] Frank, L.; Král, J.: Metody analýzy povrchu. Elektronová mikroskopie a difrakce. Praha; Academia, 1996, 379 s.

[3] Reimer

7. Seznam použitých symbolů a zkratek

BSE.....	zpětně odražené elektrony
SE.....	sekundární elektrony
PE.....	primární elektrony
FBSE.....	pružně rozptýlené zpětně odražené elektrony
AE.....	Augerovy elektrony
EREM.....	environmentální rastrovací elektronová mikroskopie
REM.....	rastrovací elektronová mikroskopie
RP, RV.....	rotační vývěva
DP.....	difuzní vývěva
V.....	vakuové ventily
C1.....	tlak omezující clona č. 1
C2.....	tlak omezující clona č. 2
JV.....	jehlový ventil
E1.....	elektroda č. 1
E2.....	elektroda č. 2
E.....	energie elektronů po interakci
E_0	počáteční energie elektronů
d.....	pracovní vzdálenost
p.....	tlak v komoře vzorku
m_e	hmotnost elektronů
v.....	rychlost elektronů
Z.....	protonové číslo
e.....	náboj elektronů
ϑ	úhel rozptylu elektronů
η	koeficient emise zpětně odražených elektronů
δ	koeficient emise sekundárních elektronů
I_{GP}	proud generovaných elektronů
I_{BSE}	proud zpětně odražených elektronů
I_{PE}	proud svazku primárních elektronů
I_{SE}	proud sekundárních elektronů
α	úhel dopadu svazku primárních elektronů
d_p	maximální hloubka pronikání primárních elektronů do vzorku
d_s	maximální vzdálenost od povrchu vzorku ze kterého se mohou uvolňovat sekundární elektrony
k.....	konstanta úměrnosti
U_s	napětí na sběrné mřížce
U_{E1}	napětí na elektrodě č. 1
U_{E2}	napětí na elektrodě č. 2
U_{C1}	napětí na cloně č. 1
U_{C2}	napětí na cloně č. 2
U_{scin}	napětí na scintilátoru

8. Seznam příloh

Příloha P1: a) Tabulka hodnot napětí na elektrodách detektoru pro jednotlivé tlaky vodních par do 300 Pa v komoře vzorku, stanovených hodnot Φ_s a Φ_T a vypočteného kontrastu.

b) Snímky přechodu emitor – báze výkonového tranzistoru pro jednotlivé tlaky vodních par do 300 Pa a nastavení napětí na elektrodách detektoru dle Tabulky P1.1.

Příloha P2: a) Tabulka hodnot napětí na elektrodách detektoru pro jednotlivé tlaky vodních par 300 až 600 Pa v komoře vzorku, stanovených hodnot Φ_s a Φ_T a vypočteného kontrastu.

b) Snímky přechodu emitor – báze výkonového tranzistoru pro jednotlivé tlaky vodních par 300 až 600 Pa a nastavení napětí na elektrodách detektoru dle Tabulky P2.1.

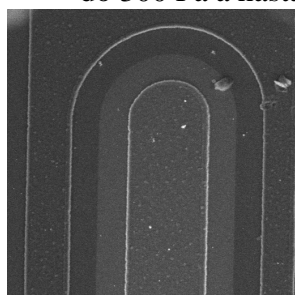
8.1 Příloha P1

Tabulka P1.1: a) Tabulka hodnot napětí na elektrodách detektoru pro jednotlivé tlaky vodních par do 300 Pa v komoře vzorku, stanovených hodnot Φ_s a Φ_T a vypočteného kontrastu.

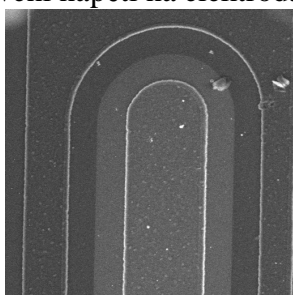
Obr. č.	p	U_{E1}	U_{E2}	U_{C1}	U_{C2}	Φ_s	Φ_T	kontrast
	[Pa]	[V]	[V]	[V]	[V]	[-]	[-]	[-]
1.1	50	100	300	550	1000	66,44	59,78	6,66
1.2	50	200	300	550	1000	84,81	75,75	9,06
1.3	50	300	300	550	1000	68,19	63,45	4,74
1.4	50	100	400	550	1000	73,29	62,47	10,82
1.5	50	200	400	550	1000	89,95	74,71	15,24
1.6	50	300	400	550	1000	81,17	63,81	17,36
1.7	50	400	400	550	1000	46,87	39,11	7,76
1.8	50	100	450	550	1000	96,67	81,76	14,91
1.9	50	200	450	550	1000	100,78	85,48	15,30
1.10	50	300	450	550	1000	85,48	62,77	22,71
1.11	50	400	450	550	1000	67,51	45,55	21,96
1.12	50	450	450	550	1000	62,68	53,08	9,60
1.13	100	100	300	550	1000	109,15	88,49	20,66
1.14	100	200	300	550	1000	134,55	97,75	36,80
1.15	100	300	300	550	1000	67,37	61,99	5,38
1.16	100	100	400	550	1000	121,11	88,27	32,84
1.17	100	200	400	550	1000	192,68	109,82	82,86
1.18	100	300	400	550	1000	114,22	51,83	62,39
1.19	100	400	400	550	1000	73,53	64,01	9,52
1.20	100	100	450	550	1000	121,42	88,36	33,06
1.21	100	200	450	550	1000	155,07	84,98	70,09
1.22	100	300	450	550	1000	148,70	69,12	79,58
1.23	100	400	450	550	1000	100,88	62,70	38,18
1.24	100	450	450	550	1000	87,67	76,26	11,41
1.25	150	100	300	550	1000	99,62	76,54	23,08
1.26	150	200	300	550	1000	80,42	45,60	34,82
1.27	150	300	300	550	1000	70,58	68,45	2,13
1.28	150	100	400	550	1000	97,30	69,76	27,54
1.29	150	200	400	550	1000	193,14	118,61	74,53
1.30	150	300	400	550	1000	89,58	40,71	48,87
1.31	150	400	400	550	1000	61,62	58,63	2,99
1.32	150	100	450	550	1000	117,32	92,40	24,92
1.33	150	200	450	550	1000	135,31	78,61	56,70
1.34	150	300	450	550	1000	101,13	41,04	60,09
1.35	150	400	450	550	1000	61,89	32,09	29,80
1.36	150	450	450	550	1000	63,83	60,72	3,11
1.37	200	100	300	550	1000	108,26	93,11	15,15
1.38	200	200	300	550	1000	74,72	51,17	23,55
1.39	200	300	300	550	1000	74,02	73,33	0,69
1.40	200	100	400	550	1000	144,55	118,82	25,73
1.41	200	200	400	550	1000	179,38	128,33	51,05
1.42	200	300	400	550	1000	70,08	31,63	38,45

1.43	200	400	400	550	1000	47,83	47,07	0,76
1.44	200	100	450	550	1000	107,25	87,11	20,14
1.45	200	200	450	550	1000	158,03	109,33	48,70
1.46	200	300	450	550	1000	137,39	79,13	58,26
1.47	200	400	450	550	1000	93,77	52,04	41,73
1.48	200	450	450	550	1000	65,86	63,43	2,43
1.49	250	100	300	550	1000	115,21	106,63	8,58
1.50	250	200	300	550	1000	96,68	78,33	18,35
1.51	250	300	300	550	1000	60,21	59,30	0,91
1.52	250	100	400	550	1000	105,52	92,23	13,29
1.53	250	200	400	550	1000	111,18	81,56	29,62
1.54	250	300	400	550	1000	68,23	39,54	28,69
1.55	250	400	400	550	1000	53,83	52,12	1,71
1.56	250	100	450	550	1000	129,43	112,81	16,62
1.57	250	200	450	550	1000	107,95	76,67	31,28
1.58	250	300	450	550	1000	113,44	74,68	38,76
1.59	250	400	450	550	1000	130,43	71,09	59,34
1.60	250	450	450	550	1000	58,36	55,78	2,58
1.61	300	100	300	550	1000	90,34	85,87	4,47
1.62	300	200	300	550	1000	58,89	52,69	6,2
1.63	300	300	300	550	1000	50,91	50,68	0,23
1.64	300	100	400	550	1000	116,78	108,87	7,91
1.65	300	200	400	550	1000	87,37	76,43	10,94
1.66	300	300	400	550	1000	81,26	65,94	15,32
1.67	300	400	400	550	1000	75,57	74,43	1,14
1.68	300	100	450	550	1000	105,02	96,27	8,75
1.69	300	200	450	550	1000	85,51	71,27	14,24
1.70	300	300	450	550	1000	84,16	63,25	20,91
1.71	300	400	450	550	1000	150,70	99,30	51,40
1.72	300	450	450	550	1000	58,50	57,45	1,05

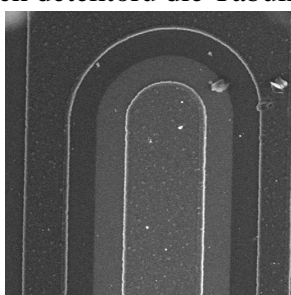
b) Snímky přechodu emitor – báze výkonového tranzistoru pro jednotlivé tlaky vodních par do 300 Pa a nastavení napětí na elektrodách detektoru dle Tabulky P1.1.



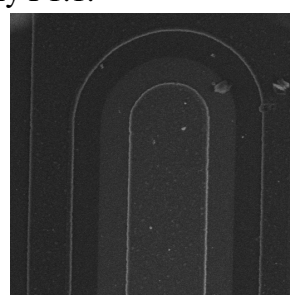
Obr. 1.1



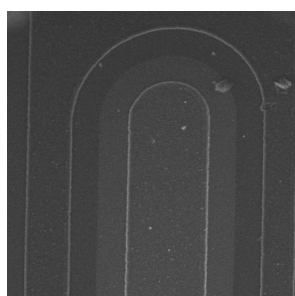
Obr. 1.2



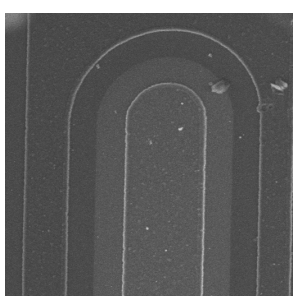
Obr. 1.3



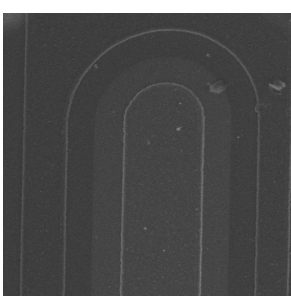
Obr. 1.4



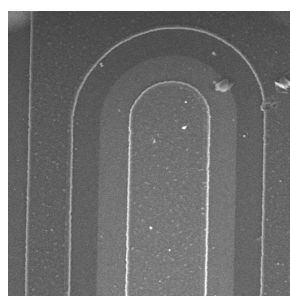
Obr. 1.5



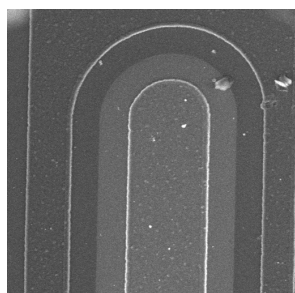
Obr. 1.6



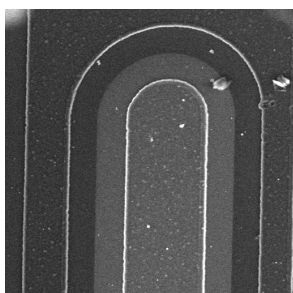
Obr. 1.7



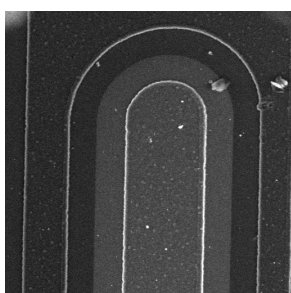
Obr. 1.8



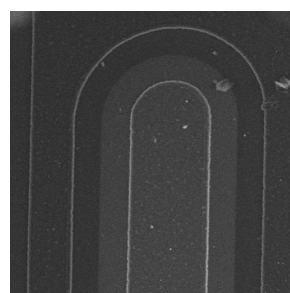
Obr. 1.9



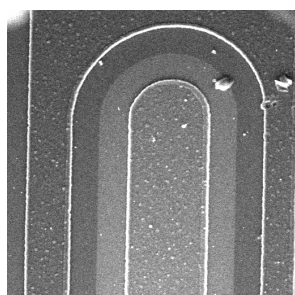
Obr. 1.10



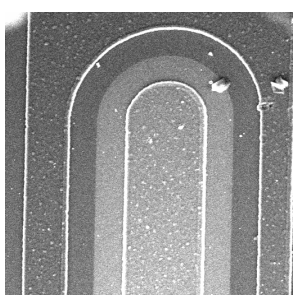
Obr. 1.11



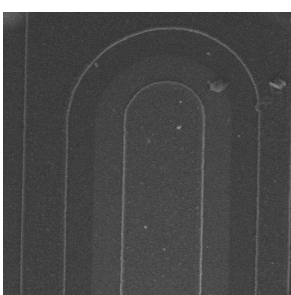
Obr. 1.12



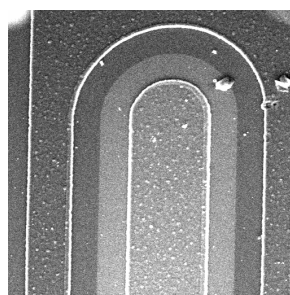
Obr. 1.13



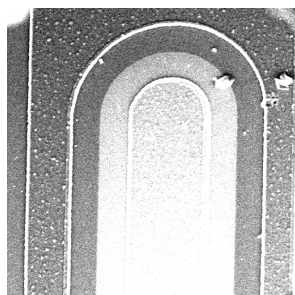
Obr. 1.14



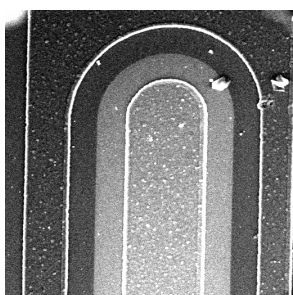
Obr. 1.15



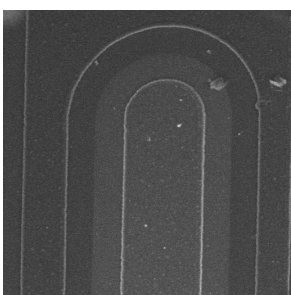
Obr. 1.16



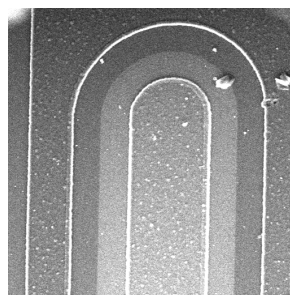
Obr. 1.17



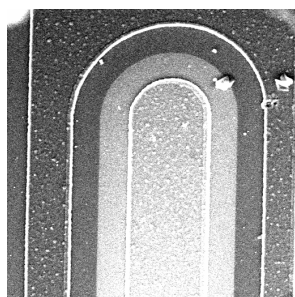
Obr. 1.18



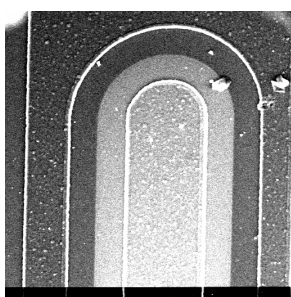
Obr. 1.19



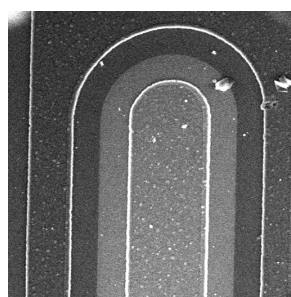
Obr. 1.20



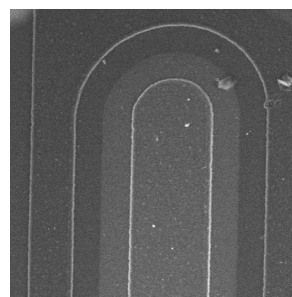
Obr. 1.21



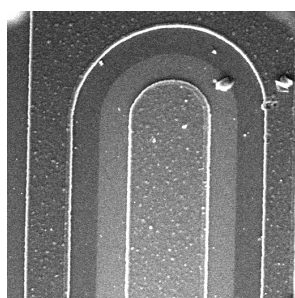
Obr. 1.22



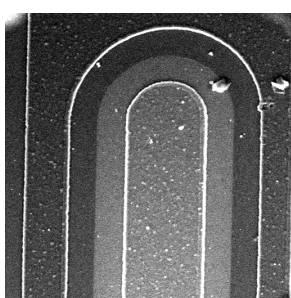
Obr. 1.23



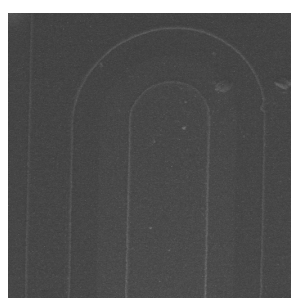
Obr. 1.24



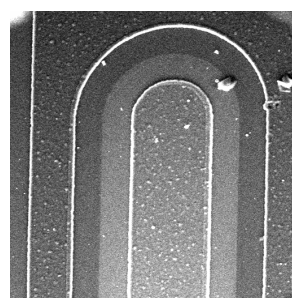
Obr. 1.25



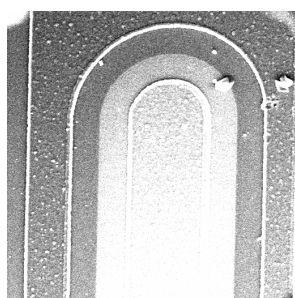
Obr. 1.26



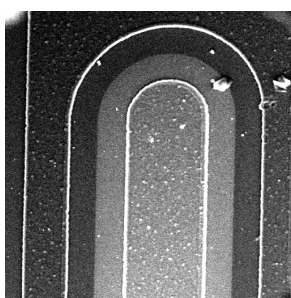
Obr. 1.27



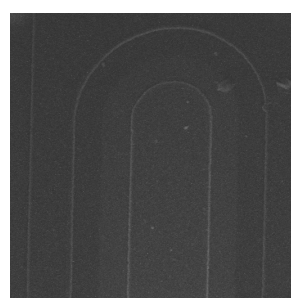
Obr. 1.28



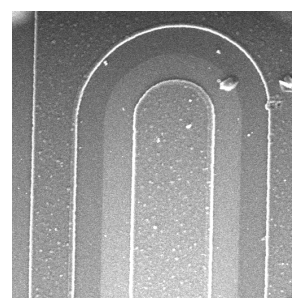
Obr. 1.29



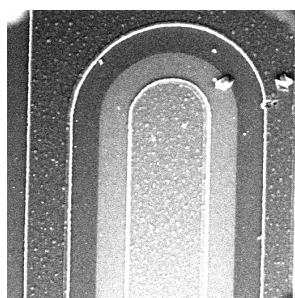
Obr. 1.30



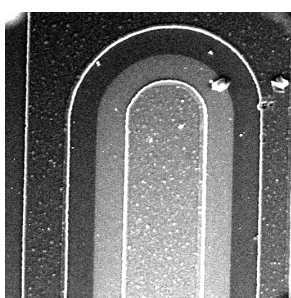
Obr. 1.31



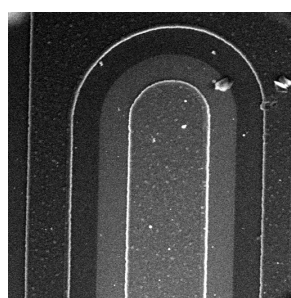
Obr. 1.32



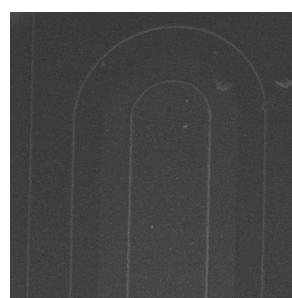
Obr. 1.33



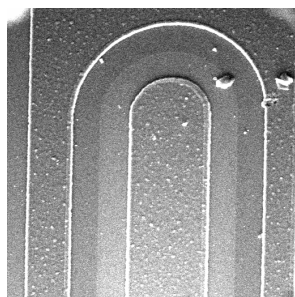
Obr. 1.34



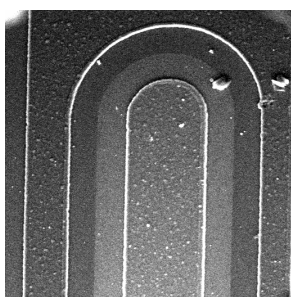
Obr. 1.35



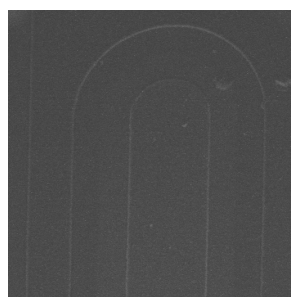
Obr. 1.36



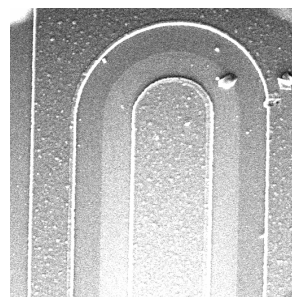
Obr. 1.37



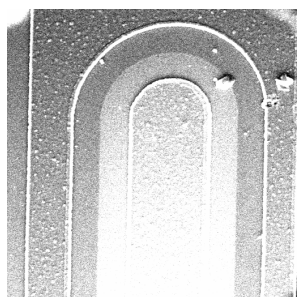
Obr. 1.38



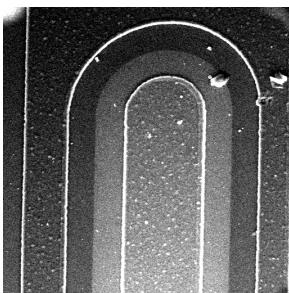
Obr. 1.39



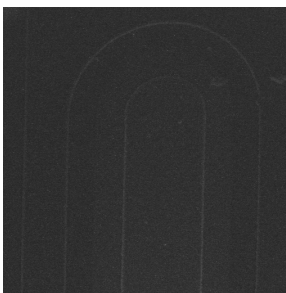
Obr. 1.40



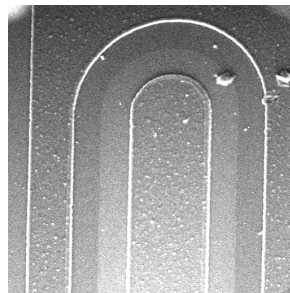
Obr. 1.41



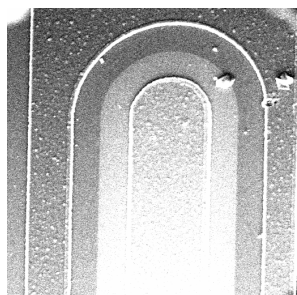
Obr. 1.42



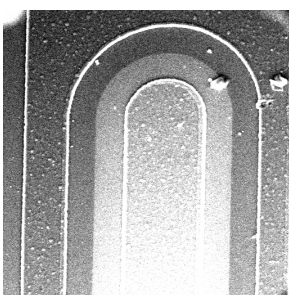
Obr. 1.43



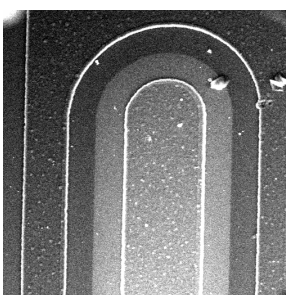
Obr. 1.44



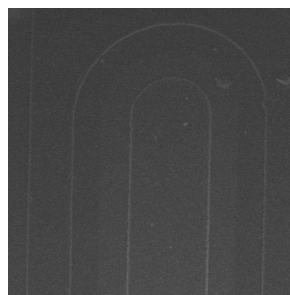
Obr. 1.45



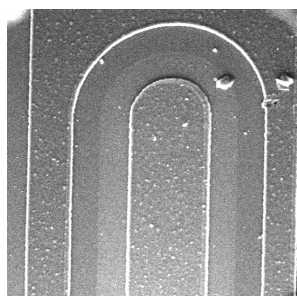
Obr. 1.46



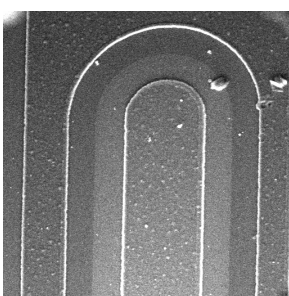
Obr. 1.47



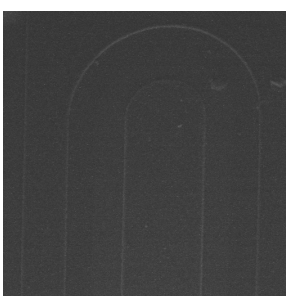
Obr. 1.48



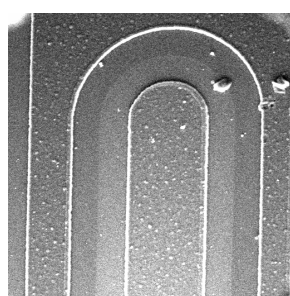
Obr. 1.49



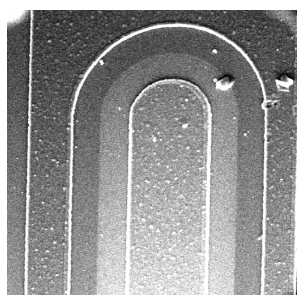
Obr. 1.50



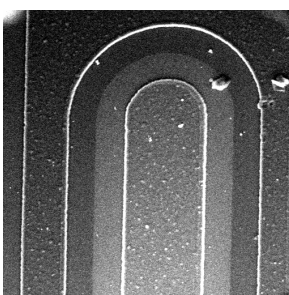
Obr. 1.51



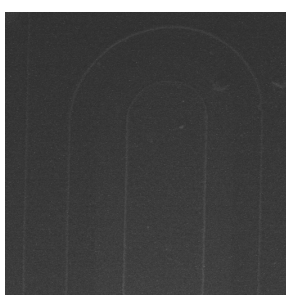
Obr. 1.52



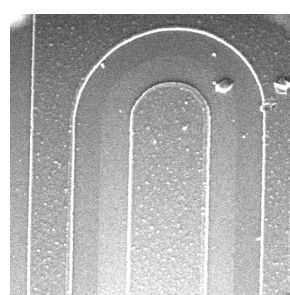
Obr. 1.53



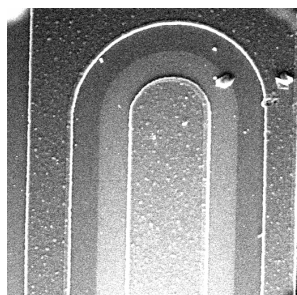
Obr. 1.54



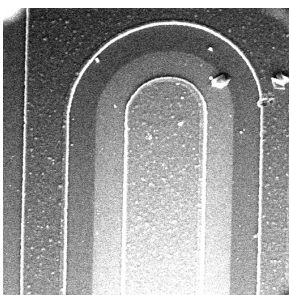
Obr. 1.55



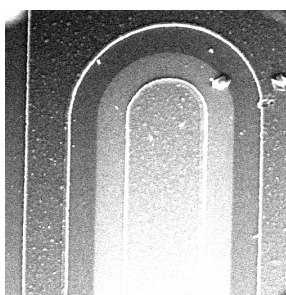
Obr. 1.56



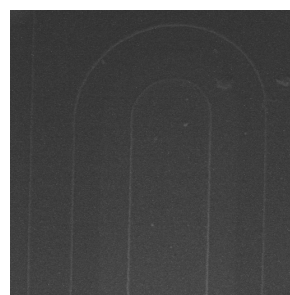
Obr. 1.57



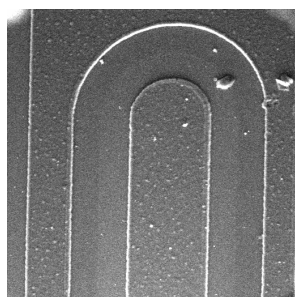
Obr. 1.58



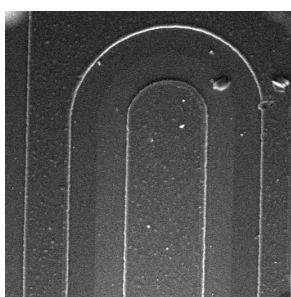
Obr. 1.59



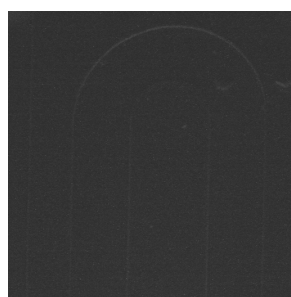
Obr. 1.60



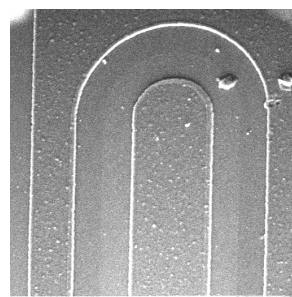
Obr. 1.61



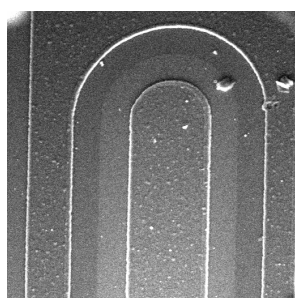
Obr. 1.62



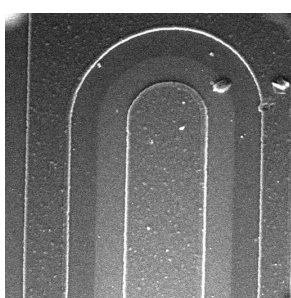
Obr. 1.63



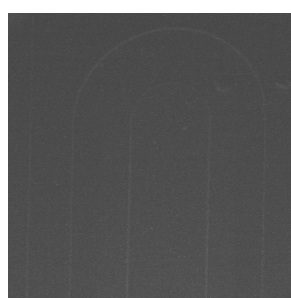
Obr. 1.64



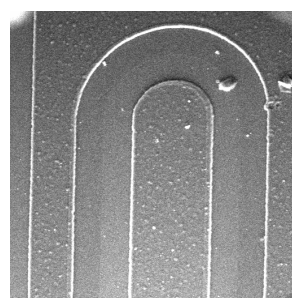
Obr. 1.65



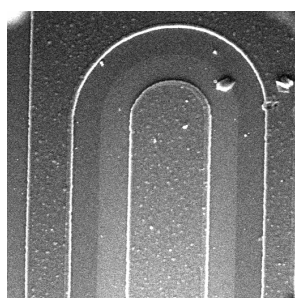
Obr. 1.66



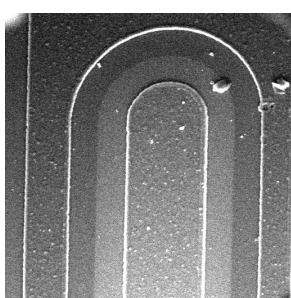
Obr. 1.67



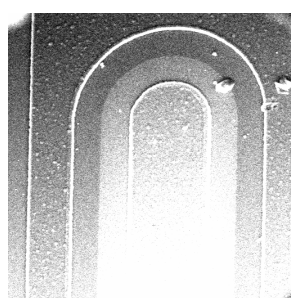
Obr. 1.68



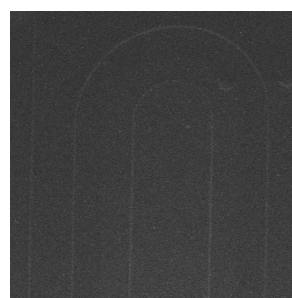
Obr. 1.69



Obr. 1.70



Obr. 1.71



Obr. 1.72

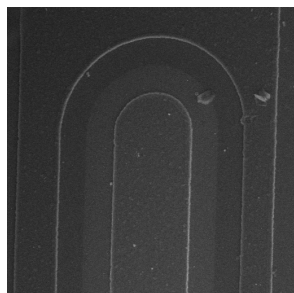
8.2 Příloha P2

Tabulka P2.1: a) Tabulka hodnot napětí na elektrodách detektoru pro jednotlivé tlaky vodních par 300 až 600 Pa v komoře vzorku, stanovených hodnot Φ_s a Φ_T a vypočteného kontrastu.

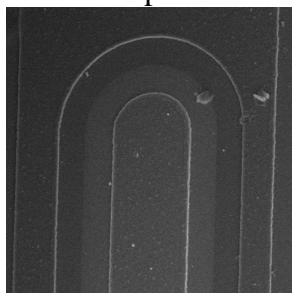
Obr. č.	p	U _{E1}	U _{E2}	U _{C1}	U _{C2}	Φ_s	Φ_T	kontrast
	[Pa]	[V]	[V]	[V]	[V]	[-]	[-]	[-]
2.1	300	240	300	520	1000	66,75	58,98	7,77
2.2	300	260	300	520	1000	74,61	64,30	10,31
2.3	300	280	300	520	1000	106,58	83,05	23,53
2.4	300	260	320	520	1000	73,43	65,01	8,42
2.5	300	280	320	520	1000	72,52	61,99	10,53
2.6	300	300	320	520	1000	108,27	84,45	23,82
2.7	300	280	340	520	1000	75,31	66,05	9,26
2.8	300	300	340	520	1000	64,20	52,40	11,8
2.9	300	320	340	520	1000	87,08	63,26	23,82
2.10	350	240	300	520	1000	61,96	56,62	5,34
2.11	350	260	300	520	1000	62,99	55,31	7,68
2.12	350	280	300	520	1000	98,89	81,00	17,89
2.13	350	260	320	520	1000	55,23	49,80	5,43
2.14	350	280	320	520	1000	55,44	47,68	7,76
2.15	350	300	320	520	1000	101,72	82,15	19,57
2.16	350	280	340	520	1000	60,97	55,08	5,89
2.17	350	300	340	520	1000	64,59	55,77	8,82
2.18	350	320	340	520	1000	97,23	79,09	18,14
2.19	400	240	300	520	1000	61,59	57,91	3,68
2.20	400	260	300	520	1000	61,00	55,49	5,51
2.21	400	280	300	520	1000	81,83	65,55	16,28
2.22	400	260	320	520	1000	55,38	51,92	3,46
2.23	400	280	320	520	1000	72,33	66,57	5,76
2.24	400	300	320	520	1000	90,41	76,66	13,75
2.25	400	280	340	520	1000	59,20	55,39	3,81
2.26	400	300	340	520	1000	51,23	45,46	5,77
2.27	400	320	340	520	1000	75,63	62,00	13,63
2.28	450	240	300	520	1000	68,30	65,76	2,54
2.29	450	260	300	520	1000	66,40	61,82	4,58
2.30	450	280	300	520	1000	64,31	54,47	9,84
2.31	450	260	320	520	1000	61,29	59,31	1,98
2.32	450	280	320	520	1000	67,42	63,21	4,21
2.33	450	300	320	520	1000	85,27	76,79	8,48
2.34	450	280	340	520	1000	65,76	63,13	2,63
2.35	450	300	340	520	1000	69,34	65,04	4,3
2.36	450	320	340	520	1000	87,44	77,36	10,08
2.37	500	240	300	520	1000	52,82	51,05	1,77
2.38	500	260	300	520	1000	59,34	56,37	2,97
2.39	500	280	300	520	1000	78,20	71,78	6,42
2.40	500	260	320	520	1000	55,02	53,23	1,79
2.41	500	280	320	520	1000	59,16	56,39	2,77
2.42	500	300	320	520	1000	71,16	64,63	6,53

2.43	500	280	340	520	1000	57,90	56,13	1,77
2.44	500	300	340	520	1000	65,04	61,67	3,37
2.45	500	320	340	520	1000	82,26	75,02	7,24
2.46	550	240	300	520	1000	59,24	57,75	1,49
2.47	550	260	300	520	1000	74,21	72,05	2,16
2.48	550	280	300	520	1000	86,28	81,42	4,86
2.49	550	260	320	520	1000	60,88	59,41	1,47
2.50	550	280	320	520	1000	74,60	71,28	3,32
2.51	550	300	320	520	1000	57,55	53,14	4,41
2.52	550	280	340	520	1000	62,32	61,01	1,31
2.53	550	300	340	520	1000	60,08	56,94	3,14
2.54	550	320	340	520	1000	59,88	55,40	4,48
2.55	600	240	300	520	1000	51,40	49,96	1,44
2.56	600	260	300	520	1000	70,17	67,68	2,49
2.57	600	280	300	520	1000	101,27	96,28	4,99
2.58	600	260	320	520	1000	70,81	69,48	1,33
2.59	600	280	320	520	1000	64,89	62,78	2,11
2.60	600	300	320	520	1000	89,11	85,06	4,05
2.61	600	280	340	520	1000	62,21	61,31	0,9
2.62	600	300	340	520	1000	78,58	76,28	2,3
2.63	600	320	340	520	1000	99,91	96,15	3,76

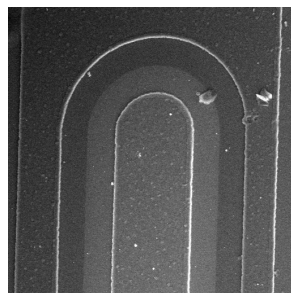
b) Snímky přechodu emitor – báze výkonového tranzistoru pro jednotlivé tlaky vodních par 300 až 600 Pa a nastavení napětí na elektrodách detektoru dle Tabulky P2.1.



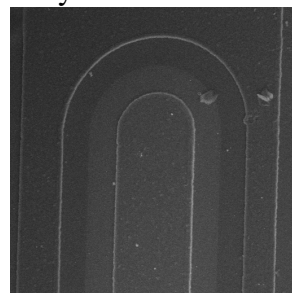
Obr. 2.1



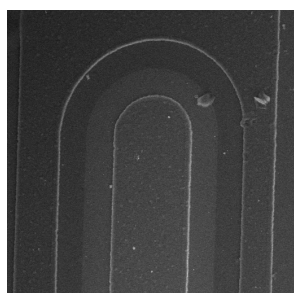
Obr. 2.2



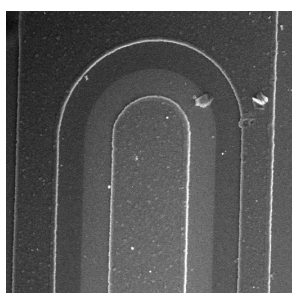
Obr. 2.3



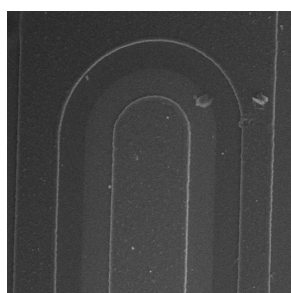
Obr. 2.4



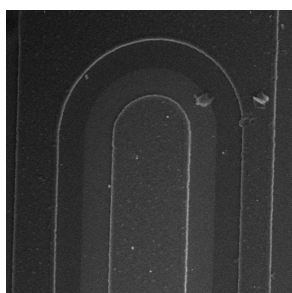
Obr. 2.5



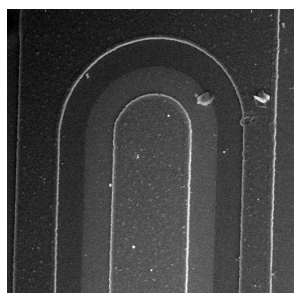
Obr. 2.6



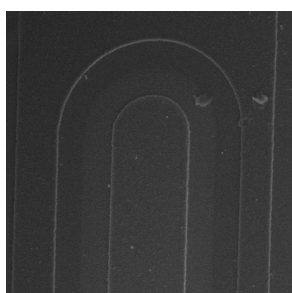
Obr. 2.7



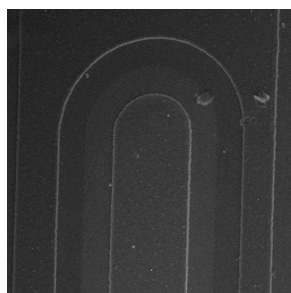
Obr. 2.8



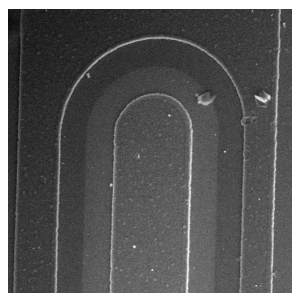
Obr. 2.9



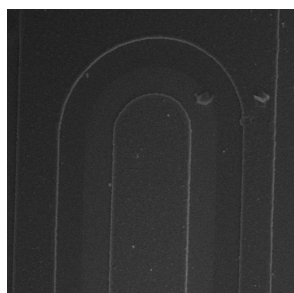
Obr. 2.10



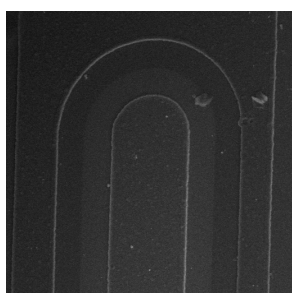
Obr. 2.11



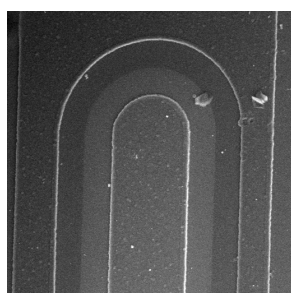
Obr. 2.12



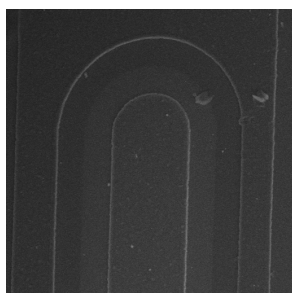
Obr. 2.13



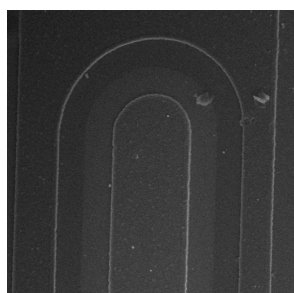
Obr. 2.14



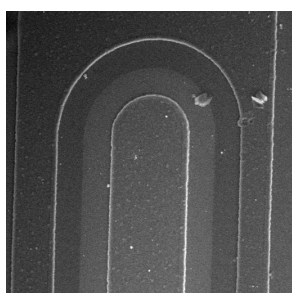
Obr. 2.15



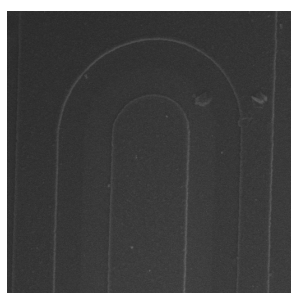
Obr. 2.16



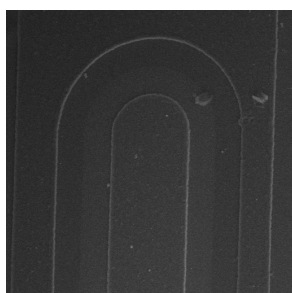
Obr. 2.17



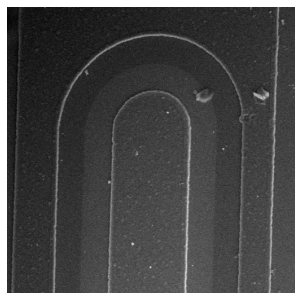
Obr. 2.18



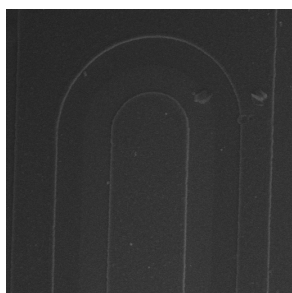
Obr. 2.19



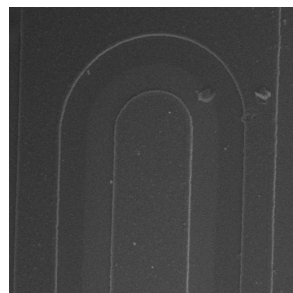
Obr. 2.20



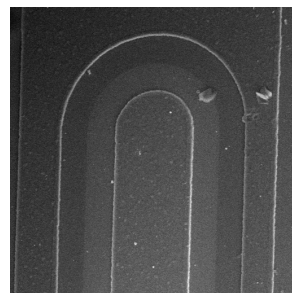
Obr. 2.21



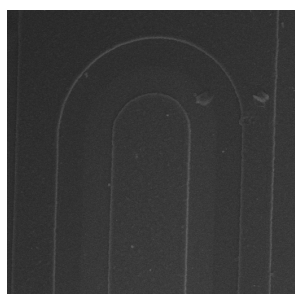
Obr. 2.22



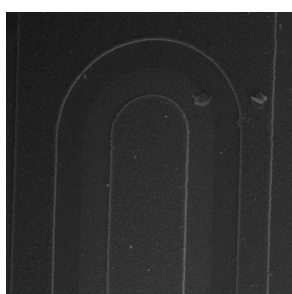
Obr. 2.23



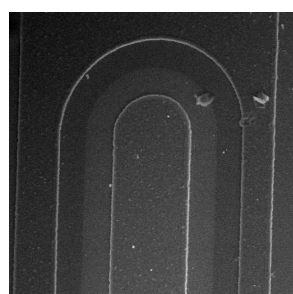
Obr. 2.24



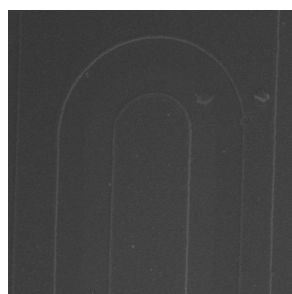
Obr. 2.25



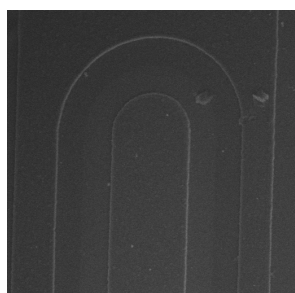
Obr. 2.26



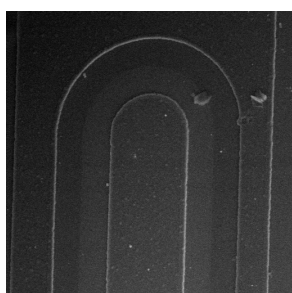
Obr. 2.27



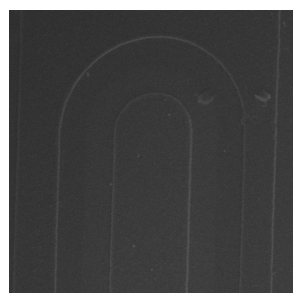
Obr. 2.28



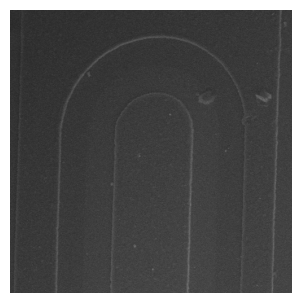
Obr. 2.29



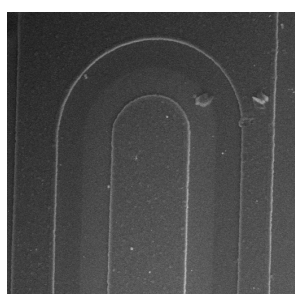
Obr. 2.30



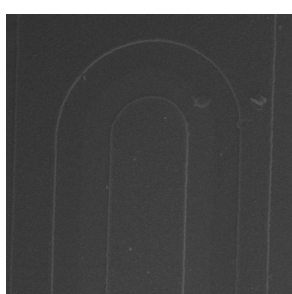
Obr. 2.31



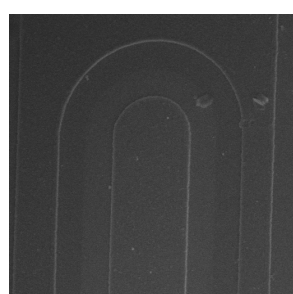
Obr. 2.32



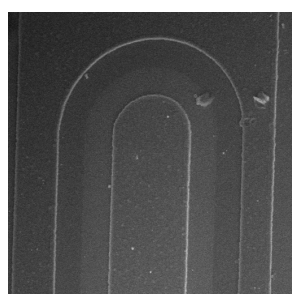
Obr. 2.33



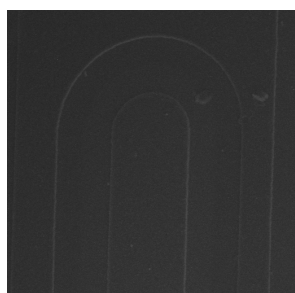
Obr. 2.34



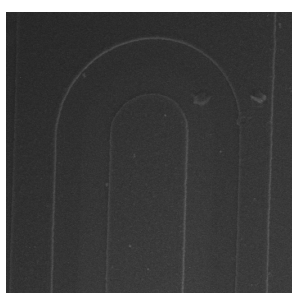
Obr. 2.35



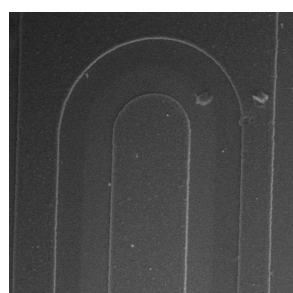
Obr. 2.36



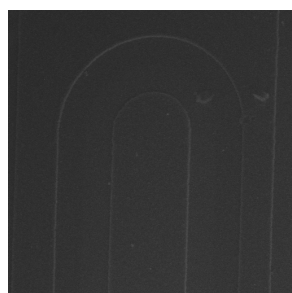
Obr. 2.37



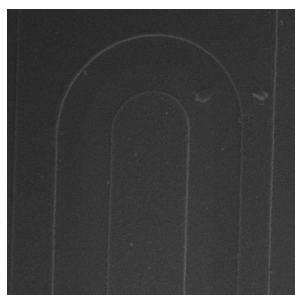
Obr. 2.38



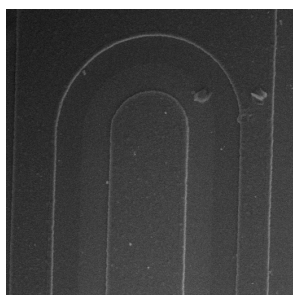
Obr. 2.39



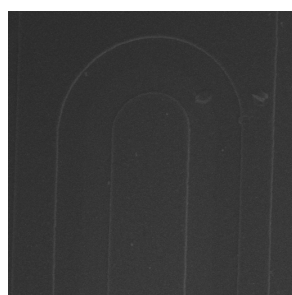
Obr. 2.40



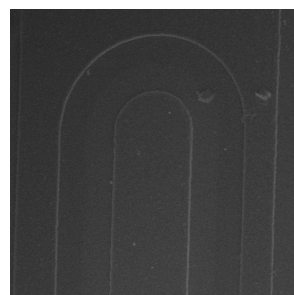
Obr. 2.41



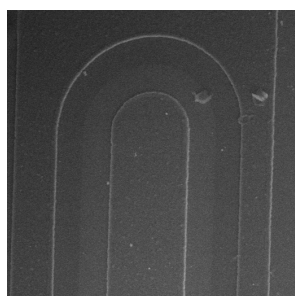
Obr. 2.42



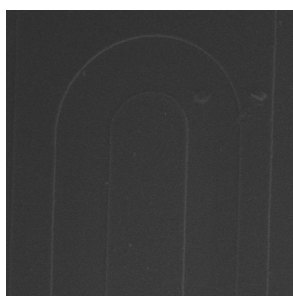
Obr. 2.43



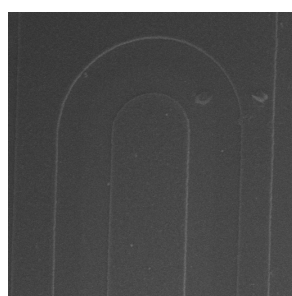
Obr. 2.44



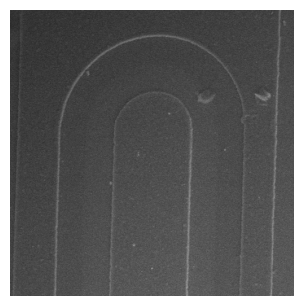
Obr. 2.45



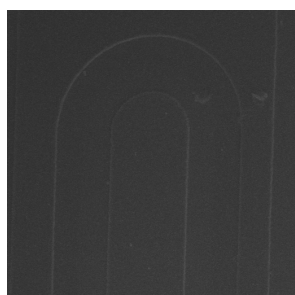
Obr. 2.46



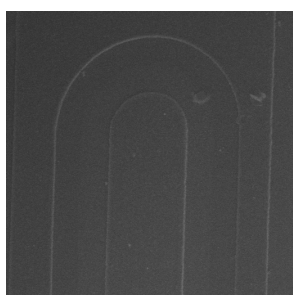
Obr. 2.47



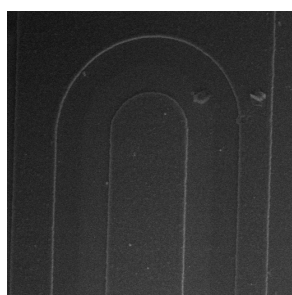
Obr. 2.48



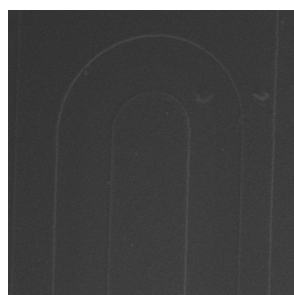
Obr. 2.49



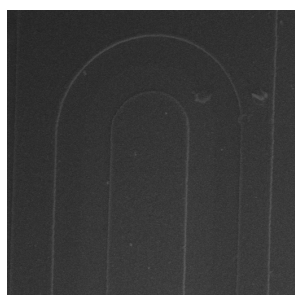
Obr. 2.50



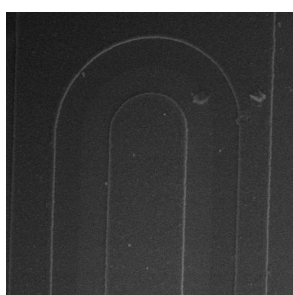
Obr. 2.51



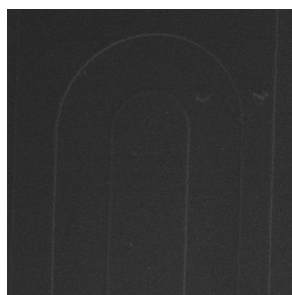
Obr. 2.52



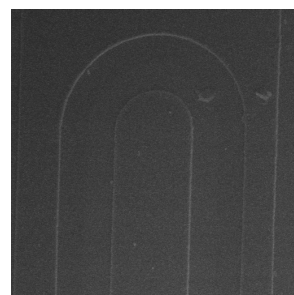
Obr. 2.53



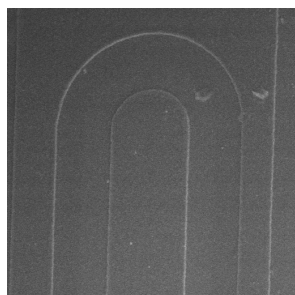
Obr. 2.54



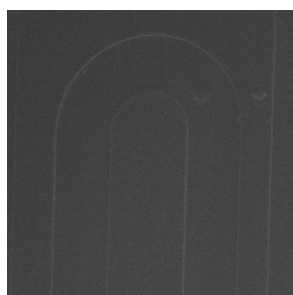
Obr. 2.55



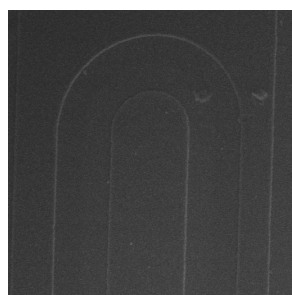
Obr. 2.56



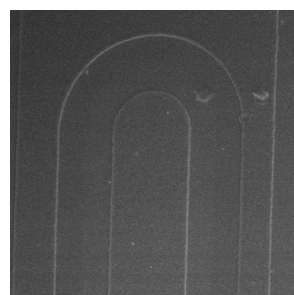
Obr. 2.57



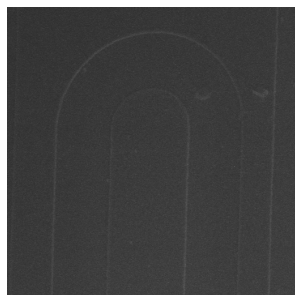
Obr. 2.58



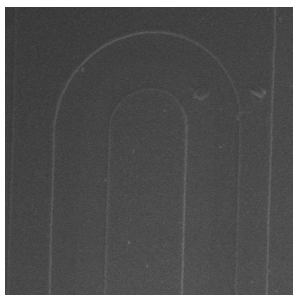
Obr. 2.59



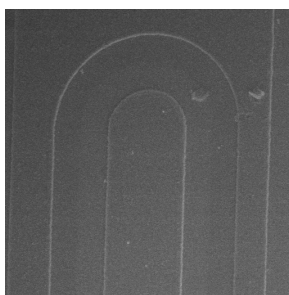
Obr. 2.60



Obr. 2.61



Obr. 2.62



Obr. 2.63